

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**

Fakulta materiálově-technologická

Katedra neželezných kovů, rafinace a recyklace



Bakalářská práce

Hodnocení kvality hliníkové slitiny v závislosti na podílu použitých vratných  
odpadů

Quality assessment of aluminium alloy depending on the part of used returnable  
scrap

2019

Václav Dvorský

## Zadání bakalářské práce

Student: **Václav Dvorský**  
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství  
Studijní obor: 3911R033 Recyklace materiálů  
Téma: **Hodnocení kvality hliníkové slitiny v závislosti na podílu použitých  
vratných odpadů**  
**Quality assessment of aluminium alloy depending on the part of used  
returnable scrap**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování literární rešerše se zaměřením na:
  - základní charakteristiku hliníkových odpadů, legislativu týkající se problematiky, možnosti využití vybraných typů slévárenských odpadů hliníku, hodnocení současného stavu využívání Al vratných odpadů.
2. Experimentální část
  - zhodnocení možnosti použití vratných odpadů pro výrobu hliníkových slitin a následnou kvalitu vyráběných produktů, návrh řešení pro zlepšení využití tohoto druhu odpadu ve výrobním procesu.

Seznam doporučené odborné literatury:

MIŠKUFOVÁ, A. a T. HAVLÍK Spracovanie a recyklácia hliníkových odpadov. Košice, 2013, 384 s.  
CAPUZZI S. a G. TIMELLI. Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling. Metals, 2018.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

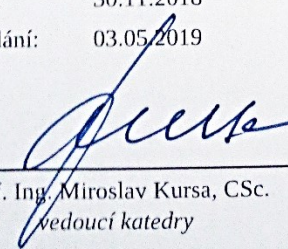
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jitka Malcharcziková, Ph.D.**

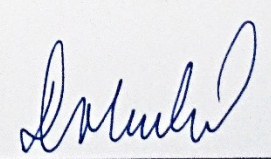
Konzultant bakalářské práce: Kamil Fabisz  
Ing. Jan Škoda

Datum zadání: 30.11.2018

Datum odevzdání: 03.05.2019



  
prof. Ing. Miroslav Kurs, CSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# **Zásady pro vypracování bakalářské práce**

## **I.**

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## **II.**

### Uspořádání bakalářské práce:

- |  |  |
|--|--|
| 1. Titulní list  | 6. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |
| 2. Originál zadání BP  | 7. Obsah BP                                  |
| 3. Zásady pro vypracování BP                                       | 8. Textová část BP                           |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení                           | 9. Seznam použité literatury                 |
| 5. Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby | 10. Přílohy                                  |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP.

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP.

ad 5) V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právnickými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 6) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 7) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 8) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 10).



Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 9) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 10) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta materiálově - technologická*  
*Katedra .....*

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia Fakulty materiálově – technologické, Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2018/2019.

Ostrava 12. 11. 2018

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
Děkanka Fakulty materiálově – technologické  
VŠB-TU Ostrava

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě ... 3. 5. 2019.

Václav Dvořský  
.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jitce Malcharczikové, Ph.D. za trpělivost, poskytnutí cenných rad, podnětné připomínky a zapůjčení nástrojů pro zpracování praktické části. Také bych chtěl poděkovat slévárně, která poskytla čas, prostor a zařízení pro zpracování praktické části. Tato firma si nepřála být oficiálně zveřejněna v této práci. Rád bych poděkoval alespoň zaměstnancům, Kamilu Fabiszovi a Markovi Janoškovi, za jejich ochotnou spolupráci.

Práce byla zpracována díky podpoře projektu č. LO1203 "Regionální materiálově technologické výzkumné centrum - program udržitelnosti" financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce je zaměřena na možnosti využití vybraných typů slévárenských odpadů hliníku pro opětovné použití přímo ve slévárnách. V teoretické části práce jsou specifikovány především odpady hliníku, které mohou vznikat ve slévárnách hliníkových odlitků, konkrétně ze slitin AlSi7. Dále byl proveden praktický experiment pro určení vlivu podílu vratného materiálu na kvalitu výsledných odlitků. Z odlitků připravených s různým podílem vratných hliníkových odpadů byly připraveny vzorky pro zkoušení mechanických vlastností a chemického složení. Na základě získaných hodnot je možné predikovat, jaký vliv na kvalitu vyrobených odlitků má použité specifikované množství různých typů slévárenských odpadů při přípravě vsázky.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** hliníkové odpady, slévárenské odpady, recyklace, odlitek, mechanické charakteristiky

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis is focused on the possibilities of using selected types of aluminum foundry waste for reuse directly in foundries. In the theoretical part of the thesis are specified mainly aluminum wastes, which can be found in foundries of aluminum castings, specifically AlSi7 alloys. Furthermore, a practical experiment was focused on effect of the return material on the quality of a castings. Samples were prepared from castings with different proportions of returnable aluminum waste for testing of mechanical properties and chemical composition. Based on the values obtained, it is possible to predict the influence on the quality of castings produced by the specified amount of different types of foundry waste in the preparation of the charge.

**KEY WORDS:** aluminum wastes, foundry wastes, recycling, casting, mechanical characteristics

## Obsah

1. Úvod.....	1
2. Hliníkové odpady.....	2
2.1 Typy hliníkových odpadů .....	3
2.2 Odpady ze slévárny hliníkových slitin.....	5
3. Využití hliníkového odpadu.....	8
3.1 Recyklační technologie .....	8
3.2 Primární a sekundární produkce .....	10
4. Ekonomické hledisko.....	11
4.1 Energie .....	11
4.2 Trh s kovy .....	12
5. Ekologie .....	13
5.1 Hliníkový průmysl .....	13
5.2 Hliník v přírodě.....	14
6. Slitiny hliníku .....	14
6.1 Slitina AlSi7.....	14
7. Legislativa.....	17
7.1 Značení odpadů hliníku .....	17
8. Cíle práce .....	19
9. Praktická část .....	20
9.1 Tavicí pec, vsázka a vzorky .....	22
9.2 Hodnocení experimentálních taveb .....	26
9.2.1 Naplynění slitiny .....	27
9.2.2 Chemické složení .....	28
9.2.3 Tepelné zpracování vzorků .....	29
9.2.4 Strukturní analýza .....	30
9.2.5 Tvrdost a pevnost .....	34
10. Závěr.....	39
Literatura: .....	40



## 1. Úvod

„Má-li člověk pochopit přírodu, nesmí se bát myslet nekonvenčně.“ Tak zní citát skotského lékaře a spisovatele A. C. Doyle. Tuto úvahu je možno parafrázovat také pro pochopení hliníkových odpadů. A k pochopení toho máme skutečně mnoho, od srovnání primárního a sekundárního procesu výroby hliníku, po technologie tavení a zpracování hliníku a jeho slitin. Dále bude představena široká škála hliníkových odpadů, které mají podle svých vlastností různá využití. Hliníkový odpad se také rozlišuje podle svého původu od běžných spotřebitelů a nebo z průmyslu. Konkrétní zaměření bude na slévárenské odpady hliníkové slitiny. Těchto odpadů vzniká pravidelně veliké množství, avšak veřejnosti, která nemá zkušenost se slévárstvím, to nemusí být zřejmé. Některé slévárenské odpady také bývají během procesu výroby kontaminovány látkami, díky kterým se stávají nebezpečným odpadem. Pro využití recyklovaných materiálů se v technické praxi také využívají určitá zařízení, která mají svá ekonomická, energetická a ekologická hlediska.

V případě že nebudeme mít pro hliníkový odpad dostatečně funkční využití, naše společnost jím bude dříve nebo později zahlcena. Spolu s tím se vyčerpají přírodní zdroje. Důležitost znovu využívání hliníku a jeho slitin je zásadní. Jako lidé jsme totiž zodpovědní za Zemi, na které společně žijeme. Pokud bychom však daný odpad bez rozmyslu zkoušeli použít pro výrobu nových produktů, mohlo by se snadno stát, že vyrobíme jen nepoužitelné zmetky. Hliníkový odpad má totiž významný vliv na kvalitu výsledného odlitku. Tyto účinky jsou obecně negativní, avšak ve velmi rozdílné u jednotlivých odpadů.

V praktické části této práce budou experimentálně zkoumány reálné vlivy přesně definovaných slévárenských odpadů. Celý experiment byl navržen a realizován podle běžných postupů slévárny hliníkových odlitků pro automobilový průmysl. Získané výsledky pak samotné slévárně poskytnout pomoc být šetrnější k životnímu prostředí, spolu s udržením výdělečnosti výroby. Ambice jsou skutečně vysoké a tato práce má za úkol se jím, pokud možno, co nejvíce přiblížit.

## 2. Hliníkové odpady

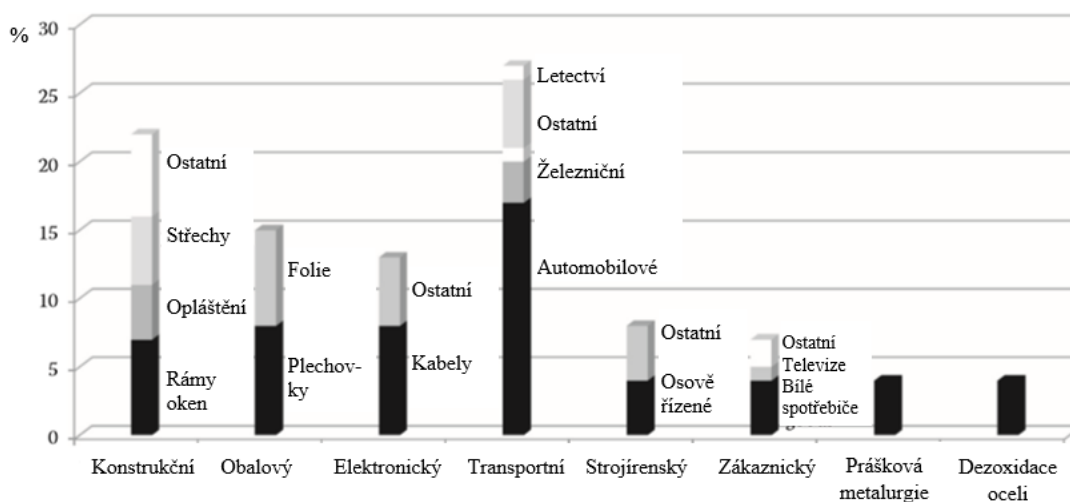
Hliník je díky svým specifickým vlastnostem nejvíce využíván v dopravě a stavebnictví, kde je žádoucí díky své nízké měrné hmotnosti a dobré korozivzdornosti. Dále se využívá jeho elektrická vodivost v elektrotechnickém průmyslu a tažnost při výrobě folií a obalového materiálu. Příkladem použití tenkých fólií z běžného života je hliníková plechovka nebo alobal na potraviny. I tyto odpady je však možné zrecyklovat při použití správných recyklačních technologií (obr. 1).



Obr. 1 Hliníkové plechovky slisované do paketových bloků

Spotřeba hliníku na celém světě, Českou republiku nevyjímaje, rok od roku roste. Pro transportní, konstrukční a obalové účely se spotřebovává největší množství hliníku a jeho slitin. Největší podíl se ho využívá v automobilovém průmyslu a stavebnictví (obr. 2).

Množství spotřeby materiálu se vždy dříve nebo později promítne i v množství vzniklého odpadu. Ve stavebnictví se však bere v úvahu mnohem delší životnost použitého hliníkového materiálu (řádově desítky let) než například u automobilů nebo elektroniky. V potravinářském průmyslu je životnost hliníkového obalu ve srovnání s jinými odvětvími zdaleka nejmenší. Průměrná životnost hliníkového materiálu pro obaly je v řádu měsíců [1]. Jako příklad je možno uvést jídlo z fastfoodu, které se balí do alobalu. V tomto případě se stává z hliníku odpad i několik minut po využití k danému účelu.



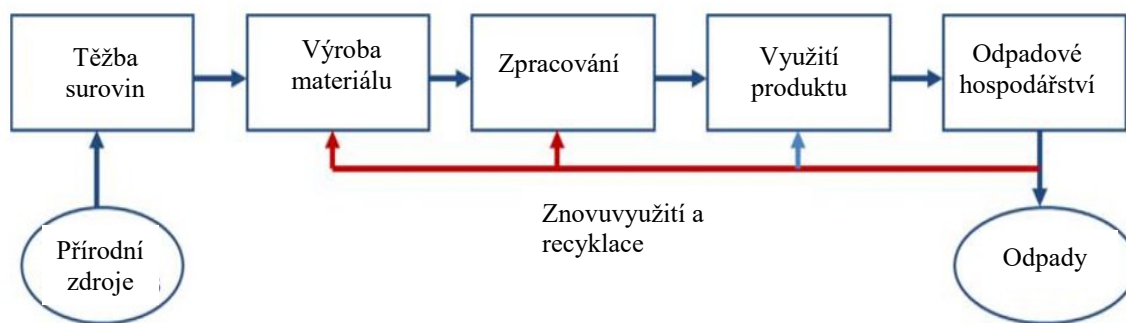
Obr. 2 Celosvětový podíl využití hliníku v roce 2010 [2]

### 2.1 Typy hliníkových odpadů

Hliníkové odpady lze rozlišovat podle mnoha hledisek. Jednak jsou to odpady, které vznikají při primární výrobě hliníku, odpady při výrobě výrobků z hliníku a jeho slitin, amortizační hliníkový odpad, odpady z druhotné výroby atd.

Výroba hliníku z primárních surovin je velmi komplexní a náročný proces - finančně, časově, energeticky a také environmentálně. Na obrázku 3 je zjednodušené schéma materiálového toku surovin od získávání přírodních zdrojů, přes surový materiál, výrobu, spotřebování až k odpad (obr. 3). Můžeme zde vidět obecné schéma procesu pro většinu kovů, hliníku nevyjímaje.

Například z technického hlediska se pak hliník rozděluje do dvou skupin dle toho, jestli se vyrábí odléváním anebo tvářením. Odlévané výrobky a jejich odpady mají kromě jiného chemického složení také vyšší křehkost. Na zvýšenou křehkost je nutno pamatovat při následném zpracování odpadů.



Obr. 3 Obecné schéma toku materiálu [3]

Při těžbě a zpracování rudy (přepřacování bauxitu na  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) obsahující hliník vzniká velké množství odpadu. Nejčastěji se pro výrobu korundu využívá Bayerův proces, produkující takzvaný červený kal, který je jedovatý pro životní prostředí. Následně při výrobě surového hliníku z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  procesem elektrolýzy vzniká mnoho odpadů i nehliníkových [2]. Další odpady vznikají v každém stupni rafinace. Většinou vzniká tím více odpadů, čím čistší hliník se vyrábí.

Při procesu výroby hliníkových produktů je nutno uvést upřesnění, že každý z dílčích kroků tohoto procesu má určité ztráty hliníku, které nelze v praxi vždy zcela eliminovat. Během lití konstrukčních součástí jsou produkovány odpady kontinuálně (v určitém množství) a nekontinuálně (při detekci nějakého nedostatku a nazývají se vadné kusy). Zcela bezodpadové technologie výroby nejsou v dnešní době dostupné.

Na konci řetězce jsou spotřebitelské výrobky použité zákazníkem, kterým je defacto celá naše společnost. Po čase ztratí výrobky z hliníku své předešlé vlastnosti a stanou se odpadem. Hliníkový odpad od občanů je svými vlastnostmi nejvíce heterogenní a jeho recyklace často také nejvíce náročná.

Velkou část komunálního odpadu tvoří hliníkové plechovky. Celosvětová spotřeba je zhruba 200 bilionů plechovek za rok [4]. Toto množství odpovídá 6700 vypitým plechovkám každou sekundu. Hliníkový průmysl vynakládá více než 800 milionů dolarů ročně na recyklování plechovek. Největší podíl znovuvyužití odpadu z hliníkových plechovek patří Brazílii díky tomu, že zpracovává 98,4 % své výroby (množství odpovídá 14,7 biliardám nápojových plechovek v roce 2014) [5]. Brazílie je následována Japonskem. Obecně je snahou hmotnost produktů snižovat, z důvodu šetření materiálu. Hmotnost průměrné hliníkové plechovky díky tomu za 40 let klesla skoro na polovinu. Stěna nápojové plechovky má dnes přibližně stejnou tloušťku jako lidský vlas [6].



## 2.2 Odpady ze slévárny hliníkových slitin

Jedním z aktuálních problémů je produkce slévárenských odpadů. Všechny slévárny produkují při dnešních technologiích velké množství odpadů. Většina z nich je však snadno recyklovatelná. Typově budou popsány slévárenské odpady hliníku na podniku produkujícím hliníkové komponenty do automobilů. Postupně budou jednotlivé odpady popsány v pořadí, v jakém z primární suroviny vznikají finální produkty. Při výrobě odlitků hliníkových slitin vznikají typově tyto odpady: úlety z pece, stěry, úkapy, vtokové soustavy, nekvalitní kusy a špony z obrábění. Nejjednodušeji využitelné odpady (recyklovatelné ve slévárně) jsou úkapy, vtokové soustavy a nekvalitní kusy. Zbylé odpady mají vyšší náročnost znovuvyužití.

Prvním odpadem v technologické posloupnosti této slévárny jsou spaliny a úlety z tavících pecí. Pro tavení se používají šachtové tavící pece s kapacitou 4 tun. Vsázku tvoří předslitiny siluminů AlSi7. Topným médiem, které ohřívá vsázku, je spalovaný zemní plyn. Plyny vzniklé spalováním obsahují velmi malé množství hliníku. Před vypuštěním spalin do ovzduší je nutné jejich čištění.

Po roztavení vsázky a odlití se z pece vyškrábe neroztavený zbytek (slévárensky nazývané stěry), který je dalším odpadem. Při dalším kroku se slitina odplyňuje a chemicky rafinuje v transportní pánvi. K odplyňování, kdy je cílem snížení obsahu rozpuštěného vodíku, který by mohl vytvořit bubliny ve slitině, se využívá nejčastěji argon a dusík [7]. Dusík je však levnější. Jakmile se pevné nečistoty vyloučí nad hladinou roztavené hliníkové slitiny, odebírají se také jako stěry do odpadu. Oba tyto částečně tuhé a sypké odpady obsahují až 80 % hliníku (obr. 4). Díky poměrně vysokému obsahu zájmového kovu se tento odpad vyváží k externí recyklaci.



Obr. 4 Hliníkové stěry v přepravním kontejneru

Při každém transportu nebo manipulaci s tekutým hliníkem se v praxi potýkáme s rizikem ukápnutí či vylití horkého materiálu. Tekutý hliník může při neopatrné manipulaci způsobit vážné popáleniny. Vzhledem k velkému objemu výroby slévárny jsou i úkapy, nashromážděné za delší časové období, nepřehlédnutelným množstvím odpadu. Ten je vhodné přidat opět do vsázky, není-li příliš znečištěn.

Ve slévárně hliníkových slitin tohoto typu se pro odlévání využívají trvalé kovové formy. Výrobní technologie jsou gravitační a nízkotlaké lití, u nichž je možnost vložení pískových jader 2. generace. U gravitační i nízkotlaké technologie lití vznikají stejné druhy odpadů, odlišné pouze v množství a poměru nevyužitelného materiálu. Již před začátkem produkování odlitků je počítáno s pravidelně vznikajícím odpadem, což jsou vtokové soustavy a odvzdušňovací nálitky (ve slévárně nazývané mrkve). V odlitcích se objevují strukturní vady s názvem staženiny. Ty jsou způsobeny chladnutím slitiny ve formě s nedostatkem materiálu. V části, která utuhne jako poslední, se kvůli nedostatku materiálu struktura poškodí za vzniku staženin. Z tohoto důvodu se vždy odlévá s přebytkem materiálu. Nálitkové mrkve jsou tedy ta část odlitku, kde jsou záměrně koncentrovány staženiny (obr. 5). Mrkve se posléze z odlitku odřezávají a pravidelně tak vzniká odpad.



Obr. 5 Odřezaná nálitková mrkev

V technické praxi je nutno tyto odpad produkovat, aby byla zajištěna vysoká kvalita samotných odlitků. Z toho vyplývá, že i při využití nejdokonalejšího lícího stroje budou vždy v malé míře tyto odpady produkovány. V běžné slévárenské praxi je těchto odpadů největší množství ale běžně se vrací jako cenná vsázka do tavicí pece (obr. 6). Výjimku tvoří pouze

vtokové soustavy obsahující sítko na bázi železa, jelikož železo je jako prvek ostře sledovanou chemickou nečistotou v silumínech.



Obr. 6 Odřezané vtokové soustavy z gravitačně litých odlitků

Odpad vznikající nepravidelně jsou vadné kusy, jinak řečeno zmetky. Pokud jsou u produktu nevyhovující vlastnosti znatelné ihned po vyjmutí z licí formy, je tento odpad nazýván zmetek ze slévárny. Dále je možno vadné kusy detekovat při kontrole rentgenem, penetrováním povrchu fluorescenční tekutinou pod UV světlem, či při kontrole rozměrové přesnosti. Všechny tyto vadné kusy nejsou nijak zvláště znečištěny a přidávají se opět do vsázky.

Všechny odlitky s vyhovujícími vlastnostmi jsou následně obráběny. Pokud se nějaké kusy při obrábění poškodí, nazývá se tento odpad zmetky z obrobny. Tyto zmetky se také přidávají do vsázky, jsou však znečištěny mimo jiné řeznou emulzí. Při tavení v peci pomocí zemního plynu se většina řezných emulzí vypaří. Přesto má dle vedoucího slévárny řezná emulze negativní vliv na kvalitu slitiny.

Odpadem, který se kontinuálně produkuje při každém obrábění jsou hliníkové špony a znečištěná řezná emulze (obr. 7). Tato kapalina má negativní vliv na následnou přetavbu hliníkových třísek a špon, a proto se odváží k externímu zpracování. Pro odstranění těchto znehodnocujících kapalin se třísky ve specializovaných firmách čistí tlakovým slisováním do briket, odtřídí silou a dalšími metodami. Samotnou řeznou kapalinu lze recyklovat, je ale nutné hlídat její kvalitu, která po čase klesá. Žádné řezné kapaliny (nové ani použité) není možno vylít do běžné kanalizace. Také není přípustný jiný únik těchto kapalin do životního prostředí. Použité řezné kapaliny mohou kromě své základní složky obsahovat také ztrátové

mazací oleje, bakterie, plísně, houby, rozpuštěný obráběný hliník atd. Moderní kapaliny lze v dnešní době využívat zhruba jeden až dva roky.



Obr. 7 Hliníkové třísky s odtékající zbytkovou emulzí v kontejneru

Posledním hliníkovým odpadem jsou výrobky poškozené v procesu montáže, povrchové úpravy a dokončovacích prací. Tyto výrobky se stanou nepoužitelnými například kvůli vzhledovým vadám, přičemž samotný odlitek má stoprocentní kvalitu. Také tyto zmetky (pokud je nelze opravit) se využívají jako vsázka do tavicích pecí. Pro slévárenské účely jsou tyto zmetky znečištěny lakem nebo oxidickou vrstvou a nekovovými součástmi jako silentbloky, těsnící kroužky atd. Těchto hliníkových zmetků je poměrně malé množství.

### 3. Využití hliníkového odpadu

#### 3.1 Recyklační technologie

Firmy zaměřené na recyklaci hliníkových odpadů, využívají jako vsázku znečištěný hliníkový odpad, který může pocházet jak od občanů, tak z průmyslu včetně sléváren, které nejsou schopny určitý hliníkový odpad využít. Výhodou hliníkových odpadů pocházejících ze sléváren je vyšší homogenita složení. Hliníkový šrot se v ČR taví nejčastěji zemním plynem v rotačních bubnových pecích. Teplota tavení hliníku, kterou je nutno překonat, je 660 °C. Ve společnosti ALUSAK v Kroměříži se jako vsázka využívá jak průmyslový, tak amortizační hliníkový odpad. V bubnových pecích (obr. 8), které mají kapacitu okolo 20 tun, se zde nejprve roztaví rafinační a krycí soli. Poté se vsází hliníkový odpad.





Obr. 8 Rotační bubnová pec z firmy SAKER spol s r.o. odštěpný závod ALUSAK

Hliník po roztavení a homogenizování putuje z bubnové pece transportními kanálky do ustalovací pece (obr. 9). Zde se hliník upravuje na tolerované množství znečišťujících látek a určené chemické složení pro daný typ slitiny. Dno této pece je speciálně upraveno tak, aby jím bylo možno dávkovat dusík, který zajišťuje odplynění slitiny. Velká pozornost se věnuje měření chemického složení, které musí splňovat přísné normy. Po dosažení vyhovujících vlastností slitiny lze přes pěnové filtry odlévat ingoty o hmotnosti zhruba 5 kg do forem. Ty jsou spojeny do dlouhého řetězce a jsou chlazeny vodou.



Obr. 9 Ustalovací pec firmy SAKER spol sr.o. odštěpný závod ALUSAK

### 3.2 Primární a sekundární produkce

Hliník a jeho slitiny se produkují třemi základními metodami. Vyrábějí se ve formě odlévaných ingotů, válcovaných pásů a protlačovaných materiálů [8]. Každá technologie výroby má svá specifika a každá může využívat jak primární, tak sekundární (recyklovaný) hliník. Porovnáno bude odlévání ingotů z primárních a druhotných materiálů. Rozdílné jsou mimo jiné v náročnosti na energie a využití materiálů. Je nutné zmínit, že oba tyto procesy výroby produkují mnoho odpadních plynů a pevných látek. Jejich množství se také může měnit v závislosti na podmínkách konkrétního provozu.

V tabulce 1 jsou znázorněny průměrné hodnoty primární a sekundární produkce při stejné hmotnosti konečných ingotů 1000 kg. V horní polovině se nachází souhrn pro primární ingoty a níže je souhrn pro sekundární ingoty. V levé polovině jsou vstupní suroviny a energie, v pravé jsou produkty. Barevná škála je určena pro grafické srovnání primární a sekundární produkce. Červená barva značí negativní a zelená pozitivní diferenci. Primární produkce je tedy mnohem náročnější na spotřebu surovin, přísad a energií. Zároveň produkuje mnohem větší množství emisí a pevných odpadů než sekundární produkce.

Tab. 1 Srovnání výroby primárních a sekundárních ingotů – upraveno podle předlohy [8]

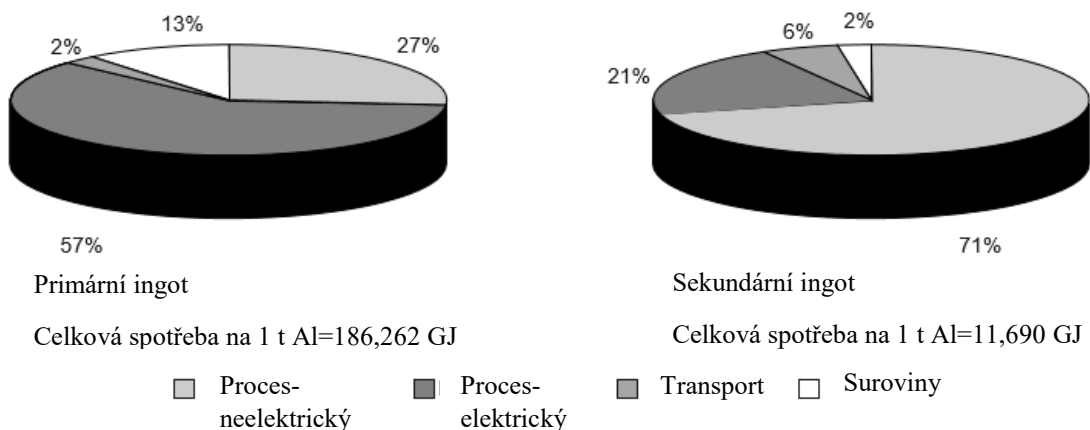
Výroba 1000 kg primárních ingotů							
Vstup procesu				Výstup procesu			
Skupina	Hodnota	J.	Druh vsázky	Skupina	Hodnota	J.	Druh produktu
Surový materiál	5090	kg	Bauxit	Emise	11564	kg	CO <sub>2</sub>
	3	m <sup>2</sup>	Zemina		74	kg	CO
	16577	l	Voda		85	kg	SO <sub>x</sub>
Přísady	143	kg	Sodný louh		40	kg	NO <sub>x</sub>
	366	kg	Koks		43	kg	PM (pevné částice)
	103	kg	Smola	Produkt	1000	kg	Hliníkový ingot
	93	kg	Mazací olej	Odpad	4590	kg	Pevný odpad
	88	kg	Vápno				
Energie	186262	MJ	Celková energie				
	69406	MJ	Nefosilní				
	116856	MJ	Fosilní				
Výroba 1000 kg sekundárních ingotů							
Vstup procesu				Výstup procesu			
Skupina	Hodnota	J.	Druh vsázky	Skupina	Hodnota	J.	Druh produktu
Surový materiál	1133	kg	Hliníkový odpad	Emise	617	kg	CO <sub>2</sub>
	963	l	Voda		1	kg	CO
Přísady	21	kg	Slitiny		5	kg	SO <sub>x</sub>
	9	kg	Rafinační soli		3	kg	NO <sub>x</sub>
	8	kg	Chemické roztoky		1	kg	PM (pevné částice)
Energie	11690	MJ	Celková energie	Produkt	1000	kg	Hliníkový ingot
	108	MJ	Nefosilní	Odpad	388	kg	Pevný odpad
	11583	MJ	Fosilní				

## 4. Ekonomické hledisko

### 4.1 Energie

Při výrobě hliníku z recyklovaného materiálu se celkově spotřebuje zhruba dvacetina energie (obr. 10) nezbytné pro výrobu hliníku z primární rudy [8]. Množství hliníku, který se recykluje, je rok od roku větší i díky tomu, že je tento způsob energetický výhodný. Z obrázku 10 lze vyčíst, že primární výroba je náročnější na suroviny a elektrickou energii. Druhotná výroba je naopak poměrově náročnější na dopravu a neelektrickou energii, nejčastěji fosilní paliva. Sumárně je spotřeba energií u primární výroby vyšší o 174,542 GJ/t.

Získávání tepelné energie pro roztavení hliníku nebo slitiny je také mnohem levnější ze zemního plynu než z elektrické energie. Vycházíme-li z průměrných cen 1 kWh energií v ČR pro malé spotřebitele, vyjde nám cena 1,46 Kč v případě zemního plynu a 4,84 Kč v případě elektrické energie [9]. V případě primární výroby hliníku je však technologicky využitelná pouze elektrolýza tavenin solí, a ta nelze nahradit tavením fosilními palivy. Z tohoto důvodu je primární výroba finančně mnohem náročnější.

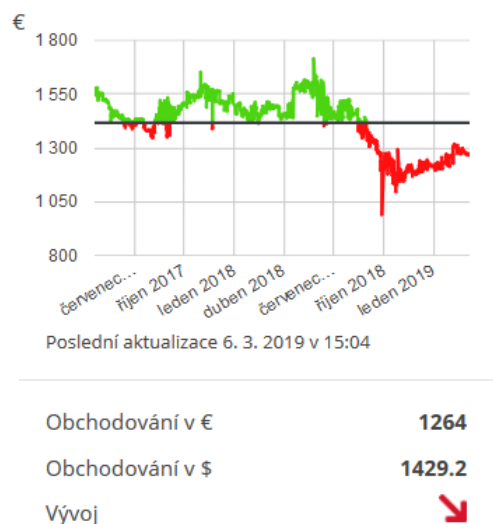


Obr. 10 Spotřeba energie u výroby primárních a sekundárních ingotů [8]

## 4.2 Trh s kovy

Část ceny hliníkového materiálu tvoří také nákladnost procesu výroby. Přibližné náklady na výrobu primárního hliníku jsou 1100 USD/tunu a sekundárního hliníku 60 USD/tunu [1]. Reálná cena za tunu sekundárního hliníku na burze je však jen o 25 % nižší než cena primárního hliníku. K datu 6. 3. 2019 je cena za tunu sekundárního hliníku na Londýnské burze kovů 1264 euro (obr. 11), v přepočtu zhruba 32 300 Kč [10]. Slitiny hliníku, které se častěji využívají než čistý kov, mají rozdílné ceny v závislosti na obsažených legujících prvcích. Například cena za 1 kg prášku AlSi7Mg ze Sichuanu v Číně stojí od 10 dolarů, v přepočtu 226 Kč [11]. Dále cenu ovlivňuje i množství chemických nečistot.



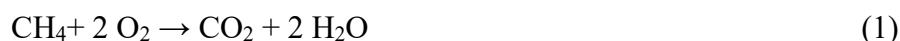


Obr. 11 Cena sekundárního hliníku na Londýnské burze [10]

## 5. Ekologie

### 5.1 Hliníkový průmysl

Výroba neželezných kovů v průmyslovém měřítku sebou nese vždy zátěž pro životní prostředí. Při těžbě bauxitu, který obsahuje hliník, dochází k rozsáhlé devastaci krajiny. Je-li hliníkový odpad recyklován, je krajina naopak ušetřena skládkování. Recyklace a následné výrobní operace s hliníkem a jeho slitinami spotřebují mnoho energie pro zahřátí materiálu nad teplotu tání a udržení této teploty po nezbytně dlouhou dobu. V těchto procesech vzniká velké množství odpadních plynů, které obsahují prach,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}_x$  [1]. Ve slévárenské praxi se pro roztavení využívá zemní plyn. Ten v ideálních podmínkách předává hliníku tepelnou energii, vzniklou exotermickou reakcí s kyslíkem dle rovnice 1.



Oxid uhličitý není jedovatý, ve velkém množství však způsobuje skleníkový efekt. Pro udržení požadované teploty slitiny v nádobách těsně před litím odlitků se využívá elektrický odpor.

Další nepříznivý vliv má také doprava materiálu. Kromě nezbytného importu surovin a exportu výrobků se v průmyslové praxi také převládá částečně hotový produkt. Některé mezikroky při výrobě se provádějí z různých důvodů mimo průmyslový závod, někdy dokonce i v jiných firmách za hranicemi ČR. Poté se často vracejí zpět do 1. závodu k dohotovení výrobku. Tímto se zvyšuje potřeba dálkové logistiky, která je převážně

v kamionové dopravě. Škodlivé látky vznikající v dopravě jsou: prach, Pb, azbest, CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> a uhlovodíky [1].

## 5.2 Hliník v přírodě

Hliníkový odpad se v přírodních podmínkách obtížně odbourává. Hliník se rozkládá pomalu díky své ochranné vrstvě Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, která je velmi stabilní. Po dobu využití je vrstva Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na povrchu každého výrobku vnímána pozitivně, zvyšuje totiž jeho životnost. Po skončení životnosti výrobku však ochranná vrstva stále funguje a přírodní procesy ji obtížně odbourávají. Hliník se v přírodním prostředí rozloží přibližně za 400 let, přičemž nápojová plechovka je schopna udržet svůj tekutý obsah i více než 100 let [6]. Každý hliníkový výrobek je plně recyklovatelný. Přitom během zhruba 2 měsíců po odběru ke druhotnému zpracování může být hliníkový materiál při dnešních postupech opět ve své původní formě [12]. Z těchto důvodů je užitečné hliníkový odpad recyklovat.

Hliníkové součásti v automobilech šetří životní prostředí díky nízké měrné hmotnosti. Snižují totiž hmotnost vozidel, které jsou z větší části vyrobené z oceli, a tím snižují i spotřebu energií, nejčastěji spotřebu fosilních paliv. Je vypočítáno, že během průměrné životnosti automobilu má 1 kilogram hliníku (při nahrazení železné součásti) potenciál snížit produkci CO<sub>2</sub> o 20 g [1].

## 6. Slitiny hliníku

Hliník se nejvíce využívá ve formě slitin. Slitiny zpravidla obsahují hlavní prvek, v našem případě hliník, a doprovodné prvky (legury), jako jsou například Si, Cu, Mg, Mn, Zn, Ti, Fe a Sn. Tyto doprovodné prvky ovlivní vlastnosti materiálu svým poměrem a případně kombinací s jinými prvky. Dále může být materiál díky legujícím prvkům tepelně vytvrditelný.

Nejznámější hliníková slitina je slitina s mědí a hořčíkem, nazvaná dural. Ve srovnání s čistým hliníkem lze dosáhnout až pětkrát větší pevnosti, než jakou má čistý hliník, zároveň při zachování srovnatelné hmotnosti [13]. Je však nevhodný pro tváření a ohýbání. Dural má uplatnění v leteckém a automobilovém průmyslu, při výrobě výtahů, jízdních kol, žebříků a další.

### 6.1 Slitina AlSi7

Hliníkové slitiny legované křemíkem se nazývají siluminy. Čistý křemík má mnohem vyšší teplotu tání než hliník, což způsobuje komplikace při rozpouštění (obr. 12). V praxi se

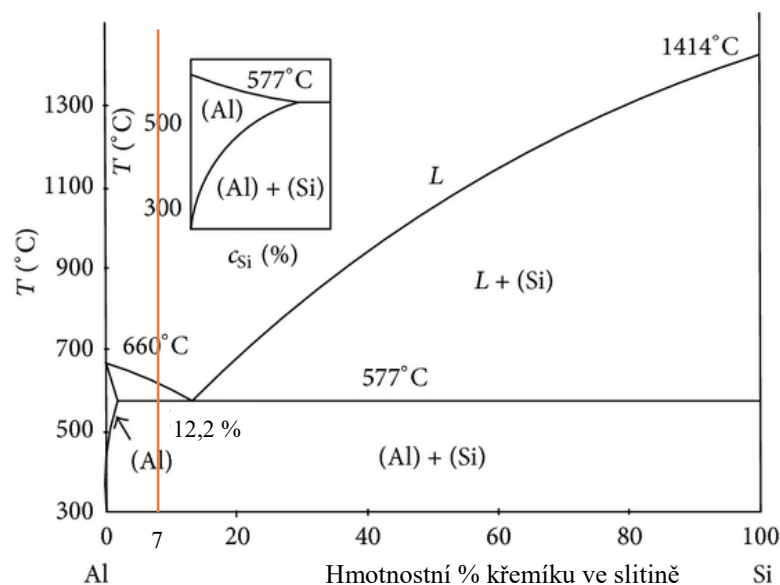
hliník taví maximálně do teploty okolo 800 °C, aby se příliš nezvyšovala rozpustnost vodíku. Při teplotě 760 °C běžné pro slévárny je však rozpouštění křemíku v hliníku časově náročné. Na trhu jde zakoupit již hotové předslitiny AlSi7. V praxi tedy většina zpracovatelů hliníkových slitin nakupuje již hotové slitiny s normovaným složením. Z důvodu této potřeby normovaných slitin také recyklační závody produkují častěji slitiny než čistý hliník.



Obr. 12 Čistý křemík přidávaný jako hlavní legura siluminů

Hliník se s křemíkem slučuje za vzniku eutektika. Čisté eutektikum je možno nalézt při 12,2 % hmotnostní koncentrace křemíku [14]. Slitina AlSi7 se v binárním diagramu Al-Si (obr. 13) nachází vlevo od eutektika, tudíž se nazývá podeutektoidní silumin. Ve slévárenské praxi je příliš náročné dosáhnout přesné koncentrace chemických prvků, a proto se předepsané chemické složení udává jako maximální a minimální procento tohoto prvku ve slitině. V rozmezí těchto limitních hodnot má tedy prvek nejpozitivnější vliv na slitinu. U všech příměsových prvků s negativními vlivy jsou udány hodnoty maximálního množství. Minimální množství je rovno nule. Pro AlSi7 se udává maximální množství 7,5 Hm. % a minimální množství 6,5 Hm. % křemíku.

Křemík je schopen zvýšit slévárenské vlastnosti hliníku. Pozitivně ovlivňuje zabíhavost díky snížení viskozity hliníku. Díky křemíku se také zvyšuje pevnost hliníku, avšak zároveň roste křehkost, čili materiál je méně plastický. Při kombinaci s dalšími legujícími prvky snižuje křemík smršťování materiálu při tuhnutí. Kovy, které zhoršují vlastnosti siluminů, jsou železo a cín [7].



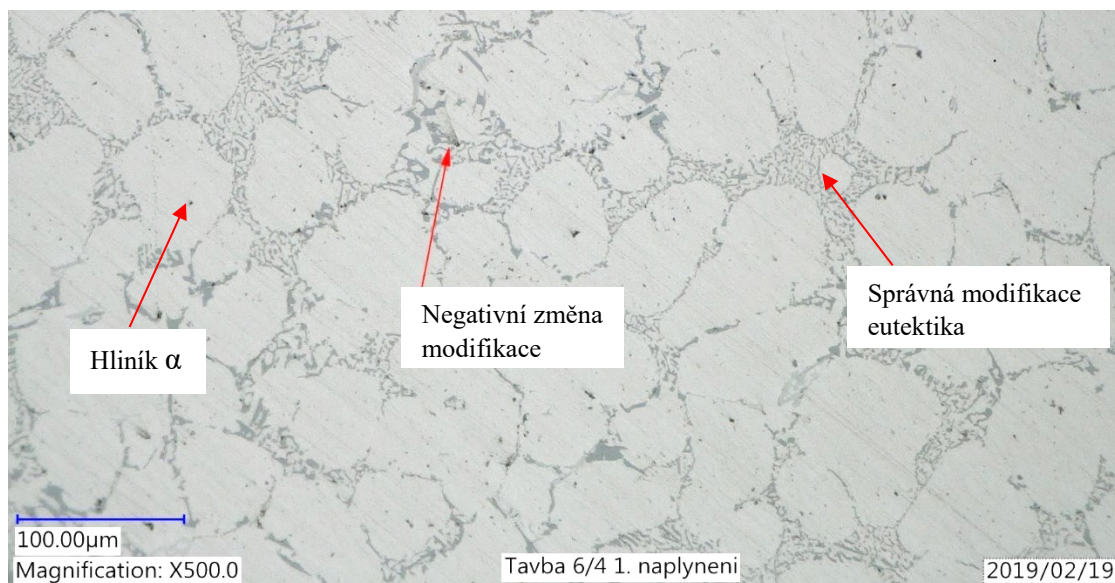
Obr. 13 Binární diagram Al-Si [14]

V této práci bude pozornost věnována konkrétní slitině AlSi7, která obsahuje doprovodné legující prvky hořčík, titan a stroncium. Všechny tyto tři legury se do roztavené slitiny běžně přidávají ve formě koncentrovaných předslutin hliníku. Díky hořčíku je možno materiál precipitačně vytvrzovat při procesu tepelného zpracování. Hořčík také zvyšuje odolnost proti korozi [7]. Ve slévárně odlitků pro automobilový průmysl jsou využívány dva typy slitin, rozdělené dle množství hořčíku pro rozdílné produkty. První slitina AlSi7Mg0,3 má normované označení EN AC-42100 a obsah od 0,25 do 0,45 Hm. % hořčíku. Druhá slitina je AlSi7Mg0,6 s označením EN AC-42200 a obsahem 0,45 do 0,70 Hm. % hořčíku.

Titan má vysokou teplotu tání a díky tomu funguje jako očkovač. Při tuhnutí slitiny vytváří rozpuštěný titan krystalizační zárodky a tím se podílí na zjemnění dendritických buněk [7]. Díky titanu se zvýší pevnost materiálu. Slitina je legována od 0,1 do 0,2 Hm. % titanu.

Stroncium působí jako modifikátor struktury. Na metalografickém výbrusu (obr. 14) AlSi7Mg0,6 legované titanem a stronciem lze pod mikroskopem pozorovat bílé oválné tvary, což je struktura  $\alpha$  (alfa) hliníku. Eutektikum má vzhled šedé sítě okolo oválů  $\alpha$  hliníku. Při správné modifikaci má však struktura eutektika zaoblenější tvar a materiál je pevnější [7]. Při nesprávné modifikaci má eutektikum tvar ostrých střepů. Jeli struktura eutektika příliš ostrohranná, materiál má nižší pevnost. Slitina je legována pouze od 0,002 do 0,015 Hm. % stroncia. Při podlegování nebo přelegování slitiny stronciem se vlastnosti materiálu zhoršují.





Obr. 14 Metalografická struktura eutektika AlSi7Mg0,6

## 7. Legislativa

Odpady také podléhají legislativě, která má za úkol snížit negativní vlivy vznikajících odpadů na životní prostředí zároveň se zajištěním udržitelného rozvoje společnosti. Česká republika se jako člen Evropské unie musí podílet na společné environmentální politice, cituji: „Povinnost ČR zpracovat plán nakládání s odpady na jejím území (POH ČR) je stanovena ve Směrnici Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech, článku č. 28. Ministerstvo životního prostředí podle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, ve znění pozdějších předpisů, zpracovalo POH ČR (Plán odpadového hospodářství České republiky) ve spolupráci s příslušnými orgány veřejné správy a veřejností.“ [15]. Platný POH byl schválený roku 2014 s platností na 9 let. Cíle, které by měl POH dosáhnout, jsou snížit měrnou produkci odpadů a pokud možno předejít jejich vzniku, ochránit lidské zdraví a životní prostředí od škodlivých účinků odpadů, zachovat životní standard evropské společnosti a také využít odpady co možná nejúčinněji. Evropské unie vydala nařízení recyklovat konstrukční odpady a sutiny. Výsledkem je, že se ze zbouraných budov recykluje 80 Hm. % hliníku [2], což je celosvětově nadprůměrné množství.

### 7.1 Značení odpadů hliníku

Z důvodu velikého množství a různorodosti odpadů jsou vytvořeny katalogy odpadů. Vyhláška č. 93/2016 Sb. obsahuje v příloze č. 1 katalog odpadů, kde jsou uvedeny i odpady z pyrometalurgie hliníku. V tabulce 2 je pak výňatek z této vyhlášky o odpadech hliníku. Je-li

u číselného označení odpadu symbol hvězdička (\*) a na konci názvu písmeno N, znamená to nebezpečný odpad. Jeli na konci názvu písmeno O, jedná se o odpady ostatní.

Tab. 2 Značení odpadů z pyrometalurgie hliníku podle Katalogu odpadů [16]

<b>10 03</b>	<b>Odpady z pyrometalurgie hliníku</b>
<b>10 03 02</b>	Odpadní anody O
<b>10 03 04*</b>	Strusky z prvního tavení N
<b>10 03 05</b>	Odpadní oxid hlinitý O
<b>10 03 08*</b>	Solné strusky z druhého tavení N
<b>10 03 09*</b>	Černé stěry z druhého tavení N
<b>10 03 15*</b>	Stěry, které jsou hořlavé nebo při styku s vodou uvolňují hořlavé plyny v nebezpečných množstvích N
<b>10 03 16</b>	Jiné stěry neuvedené pod číslem 10 03 15 O
<b>10 03 17*</b>	Odpady obsahující dehet z výroby anod N
<b>10 03 18</b>	Odpady obsahující uhlík z výroby anod neuvedené pod číslem 10 03 17 O
<b>10 03 19*</b>	Prach ze spalin obsahující nebezpečné látky N
<b>10 03 20</b>	Prach ze spalin neuvedený pod číslem 10 03 19 O
<b>10 03 21*</b>	Jiný úlet a prach (včetně prachu z kulových mlýnů) obsahující nebezpečné látky N
<b>10 03 22</b>	Jiný úlet a prach (včetně prachu z kulových mlýnů) neuvedené pod číslem 10 03 21 O
<b>10 03 23*</b>	Pevné odpady z čištění plynů obsahující nebezpečné látky N
<b>10 03 24</b>	Pevné odpady z čištění plynů neuvedené pod číslem 10 03 23 O
<b>10 03 25*</b>	Kaly a filtrační koláče z čištění plynu obsahující nebezpečné látky N
<b>10 03 26</b>	Kaly a filtrační koláče z čištění plynu neuvedené pod číslem 10 03 25 O
<b>10 03 27*</b>	Odpady z čištění chladicí vody obsahující ropné látky N
<b>10 03 28</b>	Jiné odpady z čištění chladicí vody neuvedené pod číslem 10 03 27 O
<b>10 03 29*</b>	Odpady z úpravy solných strusek a černých stěrů obsahující nebezpečné látky N
<b>10 03 30</b>	Odpady z úpravy solných strusek a černých stěrů neuvedené pod číslem 10 03 29 O
<b>10 03 99</b>	Odpady jinak blíže neurčené O

Dle státní normy ČSN 42 1331 pak odpady slévárenského hliníku AlSi spadají do třídy číslo 821. V této třídě se jsou stanoveny limity pro legující prvky: Si maximálně 13,0 Hm. %, Mg max. 0,4 Hm. %, Mn max. 0,5 Hm. % a zbytek tvoří Al. Dále se v této třídě rozdělují konkrétní typy slitin: AlSi12Mn, AlSi10MgMn, AlSi7Mg(Fe) a AlSiMgTi. Odpady slitin hliníku jsou tedy legislativou brány na zřetel velmi podrobně.

## 8. Cíle práce

V praktické části bude pozornost zaměřena na problematiku využívání hliníkových odpadů ze slévárny. Sledovaná slitina je  $\text{AlSi7Mg0,3}$  legovaná Ti a Sr, podrobněji představena v teoretické části. Odpad této slitiny se přidává do primární slitiny, čímž může mít negativní vliv na kvalitu výsledného produktu. Díky zpracování velké části produkce odpadů přímo ve slévárně lze ušetřit za dopravu, uskladnění a poplatky za služby recyklačních firem. Budou zjišťovány vlivy tří odpadů: vtokové soustavy, zmetky ze slévárny a zmetky z obrobny. K tomu poslouží experimentální tavby hliníku s předem definovaným poměrem těchto odpadů. Vzorky z těchto taveb projdou standardními testy ve slévárně. Z výsledků bude možno říci, jaký dopad na kvalitu mají dané typy slévárenských odpadů. S ohledem na závěry testů bude možno slévárně doporučit, zda má recyklace neutrální dopad na vlastnosti odlitků a je možno zpracovávat odpady v libovolném poměru, nebo jsou změny vlastností negativní a odpad bude vhodnější přidávat pouze do maximálního definovaného poměru. Přebytný odpad by v tomto případě bylo nutno odvážet ke zpracování do specializovaných firem.

## 9. Praktická část

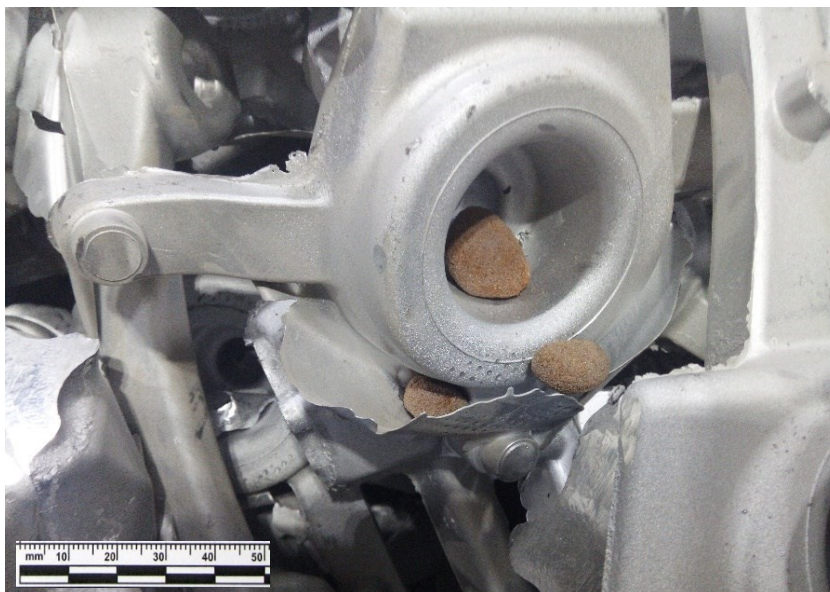
Pro praktickou část bakalářské práce byla dohodnuta spolupráce se slévárnou hliníkových slitin, která vyrábí odlitky určené pro automobilový průmysl. Ve slévárně se produkuje velké množství různých odpadů. Hliníkové odpady jako stěry z pecí nebo licích pánví a špony z obrábění není možno ve vlastním provozu zpracovávat. V případě úkapů, vtokových soustav a nekvalitních kusů (obr. 15) je však znovuvyužití odpadu v provozu běžnou praxí. Pozornost byla soustředěna právě na tyto odpady, které mohou tvořit část vsazovaného materiálu a jejich následné tavení, přípravu slitin včetně rafinace a odplynění, práci licích strojů, zpracování odlitků. Sledován byl materiálový tok odpadů po provozu a podíl jejich využití.



Obr. 15 Nekvalitní kusy z obrobny odlitků

Vedoucí slévárny, vycházející z dlouholetých zkušeností, mají v povědomí rizika recyklace. Při tavení hliníkového odpadu se dle jejich slov znehodnocuje výsledná slitina, zejména kvůli vnášení a kumulování chemických nečistot. Tyto nečistoty pocházejí zejména z cyklických operací sériové výroby ve slévárně. Kupříkladu na vnitřní plášť tavících pecí a přepravních pánví tekutého hliníku se využívají žáruvzdorné vyzdívky na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a dalších vysokotavitelných oxidů. Tyto vyzdívky však v dlouhodobém horizontu korodují a rozpouští se ve slitině, čímž ji znečišťují. V licí technologii kovových forem pro velkosériovou výrobu se na vnitřní povrch formy nanáší ochranný nástřík, který zabraňuje kontaktu odlévané slitiny s železným povrchem formy. Přesto se v praxi může obsah železa ve slitině zvyšovat, jelikož odpady přicházejí do styku s železem při jakékoli manipulaci. Během zpracování vtokových soustav se do slitiny vnáší nekovové vměstky, které byly zachyceny na tkaninovém sítku při průtoku slitiny. Samotné tkaninové sítko je po roztavení bezproblémově odebráno spolu se

stěry na hladině taveniny. Dále u technologie lití s pískovými jádry mohou v odlitcích zůstat neodstraněné zbytky jader (obr. 16), které se spolu s nekvalitnímu kusu dostávají do tavicí pece. Ostřívo z jader se poté ukládá na dně pece a velmi obtížně se odstraňuje.



Obr. 16 Vsázka tavicí pece tvořená odpadem  $\text{AlSi7Mg0,6}$  se zbytky pískových jader

Posledním negativním vlivem je vnášení  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vzniklého na povrchu každé vsázky. Zpravidla čím členitější povrch, tím větší množství  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se může dostat do taveniny. Tento oxid má teplotu tání přes  $2000\text{ }^\circ\text{C}$  a ve slévárenských podmínkách je tedy v pevném skupenství. Díky své měrné hmotnosti srovnatelné s měrnou hmotností hliníku se tento oxid vznáší ve slitině a způsobuje zhoršení pevnostních vlastností.

V praxi nejsou známy přesné důsledky přidávání odpadů do slitiny pro odlévání produktů. Tudíž byla dohodnuta spolupráce na experimentu, jež tyto důsledky vyhodnotí. Slévárna poskytla čas, prostor a nezbytná zařízení, aby mohl být proveden experiment pro praktickou část práce. Jejím výstupem bude zhodnocení pozitivních a negativních dopadů recyklování aktuálních odpadů ve slévárně hliníkových odlitků. Výsledky tohoto experimentu jsou tedy užitečné nejen pro studijní účely ale také pro slévárenský provoz.

Byly provedeny 3 tavby s různými poměry primárního a sekundárního materiálu 70/30 (70 % primární, 30 % sekundární), 60/40 a 50/50 procent, které vycházejí z běžné praxe slévárny. Zjednodušené označení je 7/3, 6/4 a 5/5. Z každé tavby byly odebrány vzorky pro stanovení chemického složení a mechanických charakteristik výsledných slitin. Označení vzorků je uvedeno v tabulce 3. Další část experimentálních vzorků tvoří kontrolní vzorky odřezaných nálitkových mrkví, které jsou jedním z recyklovaných odpadů ve slévárně. Na



vzorcích z taveb byly provedeny všechny běžně prováděné testy kvality odlitku, na vzorcích mrkví pouze chemická a metalografická analýza.

Tab. 3 Popis a označení experimentálních vzorků

Skupiny									
Tavba 7/3			Tavba 6/4		Tavba 5/5		Odřezané nálitkové mrkve		
Podskupiny pánví							Pouze vrchní části mrkve		
1. pánev	2. p.	3. p.	1. p.	2. p.	1. p.	2. p.	Kus č. 2	Kus č. 3	Kus č. 4
Vzorky									
Pro tahovou zkoušku, naplynění, chemickou analýzy									

### 9.1 Tavicí pec, vsázka a vzorky

Ve slévárně byly provedeny 3 tavby o různých poměrech přidaného odpadu. Pro tavení byla využita vždy konkrétní šachtová pec (obr. 17), která byla před vsazením zcela vyprázdněna, vyčištěna a přehřátá.



Obr. 17 Šachtová tavicí pec využitá pro experiment

Část vsázky tvořila primární předslitina AlSi7. Pro eliminaci dalších vlivů na kvalitu se pro všechny tavby použila předslitina od stejného výrobce RUSAL. Zbylou část vsázky tvořily hliníkové odpady. Pro experiment byly vybrány pouze 3 typy odpadů, které se v praxi nejvíce přidávají do vsázky. A to odřezané vtokové soustavy, zmetky ze slévárny a zmetky z obrobny v přibližném poměru 15:3:2 (ostatní odpady jsou v experimentu zanedbány). Tento poměr vsazených odpadů byl stanoven s ohledem na množství vznikajících odpadů ve slévárně, kde vtokových soustav vzniká zdaleka největší množství.

Celková hmotnost jednotlivých vsázek byla určena dle palet primárního materiálu (zhruba 900 kg) a limitní kapacity tavicí pece (4 tuny). Po vsazením přesně zvážených materiálů se vsázka zahřála vždy na teplotu 760 °C a nechala se chvíli takzvaně odstát. Při tavení vznikne pokaždé v peci takzvaný neroztavený zbytek. Ten se v peci nechal chvíli reagovat rafinační solí. Poté byl neroztavený zbytek vyškrábán a zvážen (obr. 18).



Obr. 18 Neroztavený zbytek z tavení

Slitina se z pece odlévala do přehřátých transportních pánví s kapacitou do 1000 kg. V nich probíhala chemická rafinace solí a odplynění dusíkem za pomoci rotačního odplyňovače. Zároveň byla slitina legována a modifikována předslitinami hořčíku, titanu a stroncia na přesně stanovené hodnoty. Ihned poté se z každé pánve odebíraly vzorky pro odplynění, chemickou analýzu a také pro tahovou zkoušku. Z každé experimentální tavby se odebraly 2-3 pánve taveniny, všechny pak byly po odebrání vzorků využity ve výrobě jako plnohodnotná slitina.

Výsledky všech testů byly zaznamenány a v elektronické formě. Poté byly zpracovány statistickými metodami, aby bylo možné porovnávat vliv odpadů na kvalitu slitiny. Výsledky jsou srovnávány s předepsanými normami pro kvalitu a také vůči sobě navzájem.

U každé pánve se slitinou se standardně odlévaly vzorky pro chemickou analýzu a hodnotu naplynění. Speciálně pro experiment se odlévaly vzorky na tahovou zkoušku (obr. 19).



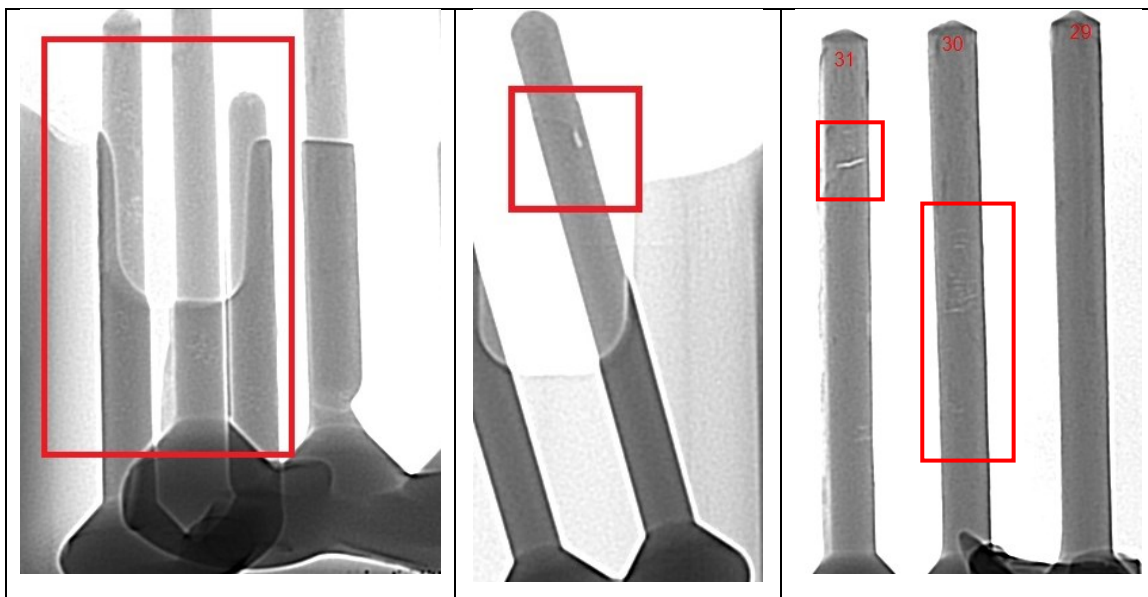
Obr. 19 Odlévání slitiny AlSi7 do grafitové formy pro tahovou zkoušku

Vzorky pro tahové zkoušky byly odlévány do předehřáté grafitové nebo ocelové formy. Přesto u obou typů forem vznikaly problémy při odlévání. Hliníková slitina nedotékala, takže byl získán jen malý počet tyčí. Jelikož má každá forma pouze 6 otvorů pro vzorky a 2 otvory pro nálitky, muselo být odlití tyčí několikrát opakováno, aby vznikl dostatek použitelných vzorků (obr. 20). Byly tak připraveny tyče s kruhovým průřezem 10 mm a délkou přibližně 100 mm.



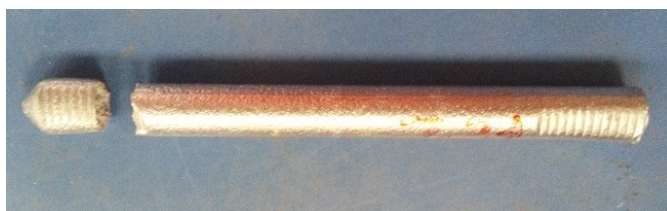
Obr. 20 Odlitky z forem pro tahovou zkoušku

Tyto pokusné vzorky byly po vychladnutí kontrolovány rentgenem. Vzhledem k detekovaným strukturním chybám u asi dvou třetin vzorků bylo rozhodnuto odlévat minimálně trojnásobek vzorků s dostatečnou délkou, aby i po rentgenové kontrole zbyl dostatek použitelných kusů. Nepoužitelné odlitky obsahovaly staženiny nebo oxidy (obr. 21). Makroskopické vady viditelné pod rentgenem pro odlitky můžeme pozorovat na obr. 21 v červených rámečcích. Vzorek vpravo označený číslem 29 je bez vady. Z ocelové formy měly odlitky menší množství licích vad. Vzhledem k náročnému zahřívání autogenem a komplikovanějšímu montování jednotlivých dílů ocelové formy však byly pro experiment použity grafitové kokily.



Obr. 21 Rentgenové snímky vzorků pro tahovou zkoušku

Při tahové zkoušce pokusných neobrobených vzorků nastalo prasknutí vždy v čelisti upínacího stroje (obr. 22). Při obrábění vzorků na přesný rozměr nevyžíhané slitiny došlo také k poškození. Proto byly všechny vzorky pro tahovou a tvrdostní zkoušku žíhány dle standardních postupů slévárny.



Obr. 22 Tyč po tahové zkoušce neobrobeného vzorku

Veškeré odebrané vzorky byly označeny a připraveny pro testování. Vzorky pro určení hodnoty naplynění byly později podrobeny metalografické analýze. Vzorky z chemické analýzy byly tepelně zpracovány, vyleštěny, byla provedena metalografická analýza, a nakonec byla zkoušena jejich tvrdost. Vzorky pro tahovou zkoušku byly vyžíhány a rentgenovou kontrolou byly vybrány kusy bez vad. Poté byly nařezány na potřebnou délku, obráběny na správný tvar a rozměr, a nakonec testovány na trhacím stroji. Zvlášť byly odebrány také náhodné vzorky nálitkových mrkví, které byly vyfrézovány, provedla se chemická analýza, byly vyleštěny a podrobeny metalografické analýze. Tyto vzorky mrkví byly odebrány pro kontrolu vlastností 100 % odpadu. Při nalezení určitého trendu změny kvality u experimentálních taveb bude možno daný trend potvrdit nebo vyvrátit hodnotami analyzovaných mrkví.

## 9.2 Hodnocení experimentálních taveb

Hmotnost každé vsázky byla zapsána s přesností na kilogramy. Pec byla vždy dobře připravena dle domluveného postupu experimentu. Během více než hodiny byla vsázka roztavena a poté se nechala před odpichem minimálně 15 minut odstát při teplotě 760 °C. V řádcích tabulky 4 jsou typy vsazených materiálů a výsledná hodnota strusky. Teoretická hmotnost vsázky vycházela z pečlivě vypočteného teoretického procenta. Do pece se vsázal materiál s přibližně odpovídající hmotností  $m_s$ , ze které bylo následně přepočteno reálné procentuální zastoupení dané vsázky v tavbě. Ve výsledku se teoretické a skutečné hodnoty liší maximálně o jedno procento, což je v podmínkách slévárenského provozu úspěch. Hodnota hmotnosti strusky je výsledek vyškrábaného neroztaveného zbytku z tavicí pece. Navzdory očekávání, že s přidáním odpadem bude podíl neroztaveného zbytku stoupat, se podíl hmotnosti strusky oproti celkové hmotnosti vsázky snižoval. Trend snížení hmotnostního procenta strusky však není lineární, tudíž mohl být způsoben i jinými vlivy.

Tab. 4 Poměr vstupních surovin a výstupních produktů experimentálních taveb

Poměry vsázky	7/3			6/4			5/5		
Procenta a hmotnosti vsázky	Teor. (%)	$m_s$ (kg)	Skut. (%)	Teor. (%)	$m_s$ (kg)	Skut. (%)	Teor. (%)	$m_s$ (kg)	Skut. (%)
Primární housky-palety RUSAL	70	2601	70,60	60	1815	60,29	50	1811	50,01
Odřezané vtokové soustavy	22,42	804	21,82	29,9	901	29,93	37,37	1361	37,58
Zmetky ze slévárny	4,37	165	4,47	5,83	167	5,54	7,29	263	7,26
Zmetky z obrobny	3,1	114	3,09	4,14	127	4,21	5,17	186	5,13
Suma	99,898	3684	100,00	99,864	3010	100,00	99,83	3621	100,00
Z toho struska-výsledek	-	95	2,58	-	24	0,80	-	25	0,69

Po odlití slitiny do transportní pánve probíhalo standardní odplynění a rafinace. Během legování všech taveb a jednotlivých pánví se přidávalo standardní množství předslitin titanu a stroncia. Při legování slitiny hořčíkem však obsluha slévárny způsobila chybu a 2. tavby v pořadí nalegovala značně odlišným množstvím hořčíků. První tavbu 7/3 totiž obsluha



legovala na 0,3 Hm. % Mg. Druhá tavba 6/4 byla legována na jiný typ slitiny s 0,6 Hm. % Mg, využívané kvůli odlišným vlastnostem pro jiné výrobky. Tato chyba vznikla nedorozuměním a byla zjištěna jen pár dní před poslední tavbou 5/5. Pro účel detekce vlivu podílu odpadu na kvalitu slitiny, bylo rozhodnuto tavbu 5/5 legovat 0,3 Hm. % Mg pro úplnou srovnatelnost s tavbou 7/3.

Další komplikací bylo vsázení odpadu pro tavbu 6/4, kdy bylo místo zmetků z obrobny nutno použít nachystané zmetky ze slévárny s odřezanými vtokovými soustavami a obroušenými hranami. Celková hmotnost vsázky odpadu byla zachována. U ostatních taveb nenastaly komplikace, které by mohly mít vliv na výsledky.

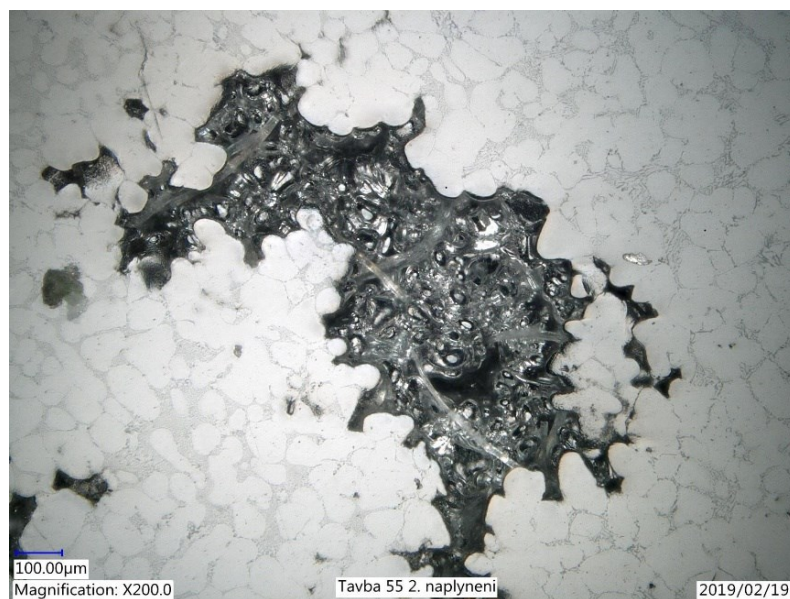
### 9.2.1 Naplynění slitiny

Hodnoty naplynění slitiny byly testovány přímo ve slévárně. Vzorky se vložily do speciálního přístroje, který slitinu přetavil ve vakuu. Poté byly vzorky zváženy na vzduchu a ve vodě na přesnou hmotnost. Výpočtem rozdílů těchto hodnot se vypočetlo naplynění. Výsledky byly vloženy do tabulky 5. Hodnoty vyšly u všech pánví téměř shodně a limitní hodnoty pro naplynění překročeny nebyly.

Tab. 5 Hodnoty naplynění slitiny pro tavby 7/3, 6/4 a 5/5

Tavby	Vzorky	Naplynění (%)
7/3	1. pánev	2,65
7/3	2. pánev	2,65
7/3	3. pánev	2,6
6/4	1. pánev	2,64
6/4	2. pánev	2,64
5/5	1. pánev	2,64
5/5	2. pánev	2,65

Všechny vzorky měly po rozřezání drobné staženiny, které byly viditelné okem. Vzorek z tavby 5/5 z 2. pánve má hodnotu naplynění 2,65 %. Největší bublina tohoto vzorku byla pod mikroskopem snadno detekována při 200 násobném zvětšení (obr. 23). U vzorků pro test naplynění je porušení struktury a vznik bublin vždy očekávaným jevem. Použití odpadu ve vsázce nemělo znatelný vliv na naplynění slitiny, jak je patrné z tabulky 5.



Obr. 23 Vzorek naplynění tavby 5/5, největší bublina

#### 9.2.2 Chemické složení

Analýza chemického složení se prováděla taktéž v provozu slévárny. Vzorky byly testovány jiskrovým spektrometrem metodou optické emisní spektrometrie na vyfrézované straně. Chemické složení je pro slévárnu velmi zásadní informací. Spolu s vysokými nároky na kvalitu odlitků jsou i normy chemického složení přísně limitované. Jelikož má vsázkový materiál často heterogenní složení, je nutné provádět chemickou analýzu několikrát během přípravy slitiny s následnou úpravou složení, dokud se nedosáhne požadovaného složení podle normy. Pokud má slitina nedostatečné množství legujících kovů, lze jej vždy dodatečně přidat ve formě předslitiny. V případě že má však slitina přebytek některého kovu nad limitní hodnotu, stává se slitina nepoužitelnou. Ve slévárenské praxi se poté tato znečištěná slitina ředí chemicky kvalitnější slitinou, aby se redukoval podíl nadlimitního prvku. V případě přetavby odpadu s legujícími prvky, které se v materiálu opakovaným použitím slitiny kumulují, hrozí riziko přelegování. Množství prvků jako je kyslík, vodík a uhlík na daném zařízení nelze stanovit.

Z chemické analýzy prvků ve slitině bylo získáno velké množství dat, které byly následně statisticky zpracovány. Analýza proběhla na 3 vzorcích z tavby 7/3, 2 vzorcích z 6/4, 2 vzorcích z 5/5 a 3 vzorcích mrkví. Všechny hodnoty byly průměrovány dle svých skupin. Vyhodnocení bylo provedeno na nejzásadnějších prvcích, kterými jsou hlavní prvek Al, legury Si, Mg, Ti a Sr, nejvýznamnější znečišťující prvky Mn, Fe, Zn, Ni, Cu a souhrn prvků, které nebylo možno rozlišit.

V tabulce 6 jsou uvedeny hodnoty obsahu vybraných prvků v hm. %. V případě Mg nejsou získaná data navzájem plně srovnatelná, z důvodu dvou různých typů slitin, odlišných pouze dle chemického procenta Mg. V tabulce jsou také uvedeny hodnoty normovaného složení, které nesmí být překročeno a jsou označeny jako „Max %“ a „Min %“. Dle získaných výsledků nenastal žádný případ, kdy by bylo překročeno normované chemické složení. Slitina byla tedy vždy využitelná pro odlévání i přes obsah recyklovaného odpadu. Množství Si se zvyšovalo s přibývajícím odpadem. Při přetavování slitiny plamenem dochází ke ztrátám Mg, tudíž se slitina daným prvkem nepřesytí. Množství Ti a Sr závisí především na zkušenosti zaměstnanců, kteří slitinu legují. K mírnému navýšení došlo v případě Mn, Fe a Zn. Ke snížení naopak nepatrně došlo u Ni, všech zbylých kovů a samotného Al. Recyklace konkrétní hliníkové slitiny nemá výrazně negativní vliv na chemické složení.

Tab. 6 Výsledky analýzy chemického složení

Prvek (%)	Si	Mg 0,3	Mg 0,6	Ti	Sr	Mn
Maximální %	7,5	0,45	0,7	0,2	0,015	0,055
Minimální %	6,5	0,25	0,45	0,1	0,002	0
7/3	6,9813	0,2933		0,1523	0,00343	0,0016
6/4	7,0460		0,5345	0,1240	0,00495	0,0017
5/5	7,1405	0,3150		0,1380	0,0033	0,0023
Nálitková mrkev	7,0507		0,5210	0,1337	0,0037	0,0024

Prvek	Fe	Zn	Ni	Cu	ostatní	Al
max %	0,16	0,055	0,025	0,08	0,1	91,148
min %	0	0	0	0	0	92,898
7/3	0,0987	0,0023	0,00313	0,0011	0,03347	92,43
6/4	0,1090	0,0006	0,00335	0,0011	0,03205	92,14
5/5	0,0991	0,0039	0,0025	0,0012	0,0295	92,26
Nálitková mrkev	0,1002	0,0038	0,00243	0,0011	0,0289	92,1533

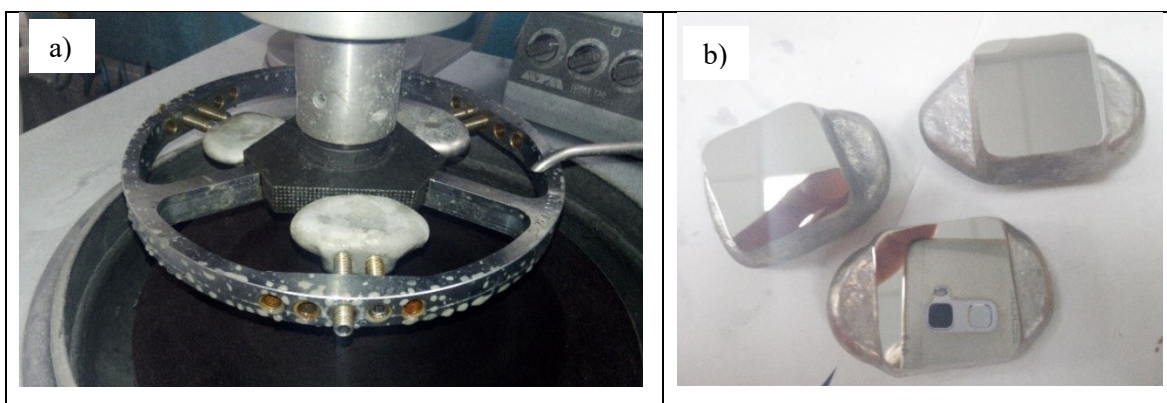
### 9.2.3 Tepelné zpracování vzorků

Veškeré odlitky z této slévárny procházejí procesem tepelného zpracování dle přesně stanoveného programu. Také experimentální vzorky pro test pevnosti a tvrdosti byly podrobeny tomuto procesu, který zlepšuje mechanické vlastnosti této slitiny. Všechny vzorky byly v jednom koši, tudíž se vystavily přesně stejným podmínkám. V programu tepelného zpracování prošly vzorky nejprve fází takzvaného rozpouštění po dobu 5 hodin při teplotě 535 +/- 5 °C. Pro srovnání teplota likvidu pro eutektikum dané slitiny je 577 °C. Materiál se tedy během procesu rozpouštění dostane jen 42 °C od teploty tání, čímž se struktura stane

plastickou a dojde ke změně dendritické (stromečkovité) struktury. Druhou fází bylo následné prudké chlazení vodou při maximální teplotě 40 °C po dobu 5 minut. V poslední fázi proběhlo takzvané stárnutí po dobu 5 hodin při teplotě 155 +/- 3 °C. Tím získaly vzorky lepší vlastnosti. Vedlejším účinkem procesu bylo částečné smazání detailních fixových popisků.

#### 9.2.4 Strukturní analýza

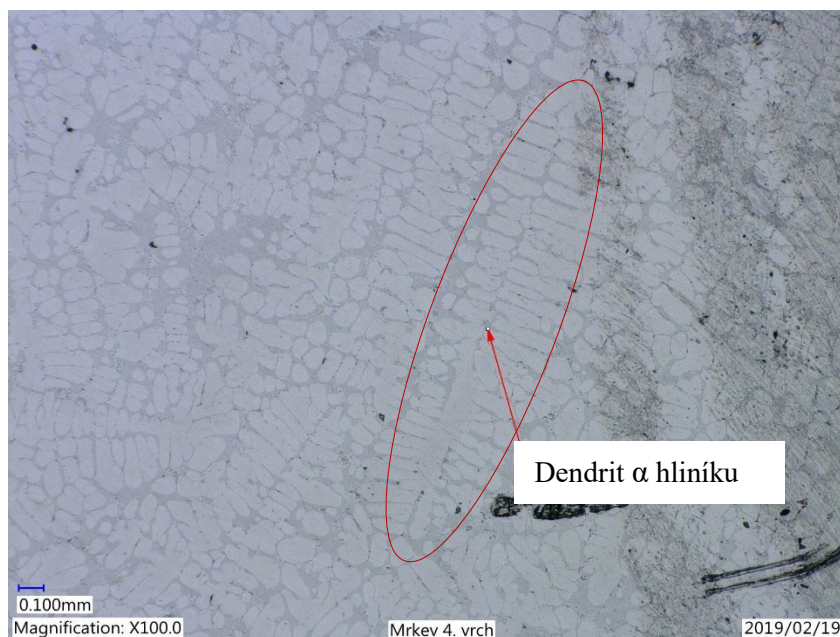
Pro metalografické pozorování digitálním světelným mikroskopem byly využity vzorky z chemické analýzy, rozpůlené vzorky pro testy naplynění a nálitkové mrkve. Všechny vzorky byly postupně broušeny na 5 papírech s různou zrnitostí od nejhrubšího po nejjemnější (obr. 24 a). Výsledkem byl dokonale hladký a lesklý povrch (obr. 24 b).



Obr. 24 a) automatizované leštění vzorků, b) vyleštěná plocha vzorků

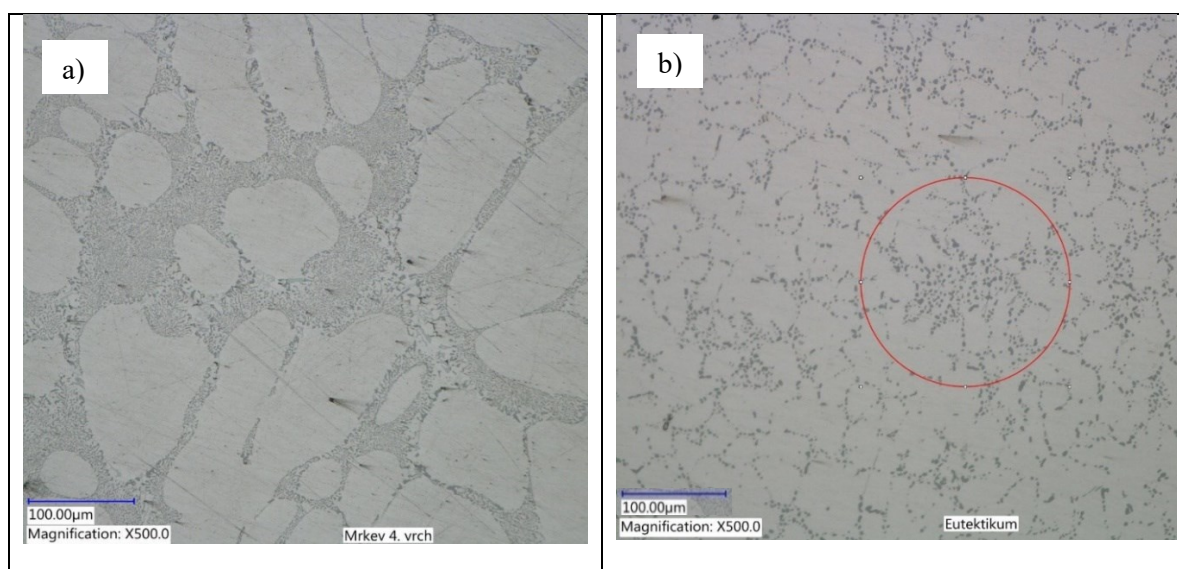
Zásadní rozdíl ve struktuře slitiny AlSi7Mg byl pozorován mezi skupinou odřezaných nálitkových mrkví a vzorky z chemické analýzy. Důvodem odlišnosti je doba chlazení. Mrkve, jako extra část základního odlévaného výrobku, chladne po vyjmutí z formy na vzduchu poměrně dlouhou dobu. Eutektikum má tedy dostatek času vytvořit strukturní uskupení do dendritů (obr. 25). Tato pravidelná uskupení  $\alpha$  hliníku v síti eutektika jsou orientována směrem k místu největšího ochlazování, čímž je zpravidla povrch odlitku (dle pracovníků oddělení kvality).





Obr. 25 Struktura slitiny – dendrit  $\alpha$  hliníku

Tepelné zpracování využívá prudší ochlazení, které zanechá strukturu v méně uspořádaném stavu. Rozdíl je patrný na obrázcích 26 a) a b). Oba snímky mají shodné zvětšení. Na obrázku vlevo je struktura nálitkové mrkve, která pozvolna chladla na vzduchu (obr. 26 a). Vpravo je struktura slitiny o téměř shodném chemickém složení (obr. 26 b). Díky tepelnému zpracování jsou však pozorovatelné menší buňky hliníku  $\alpha$ . Materiál s jemnější strukturou má zpravidla vyšší mechanické vlastnosti.

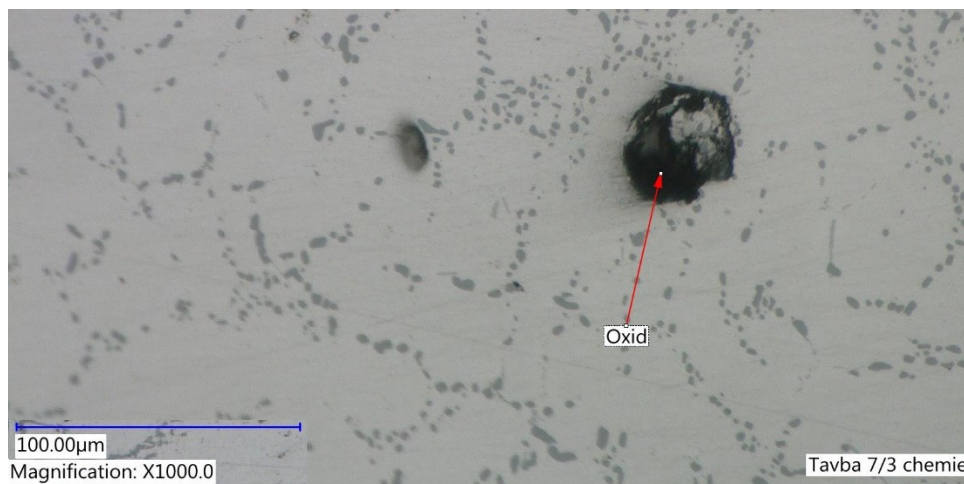


Obr. 26 Struktura slitiny: a) vzorek bez tepelného zpracování, b) tepelně zpracovaný vzorek

Při hodnocení kvality slitiny z taveb 7/3, 6/4 a 5/5 bylo cílem detekovat strukturní vady. Pro srovnávání byly použity pouze vzorky původně použité pro chemickou analýzu po

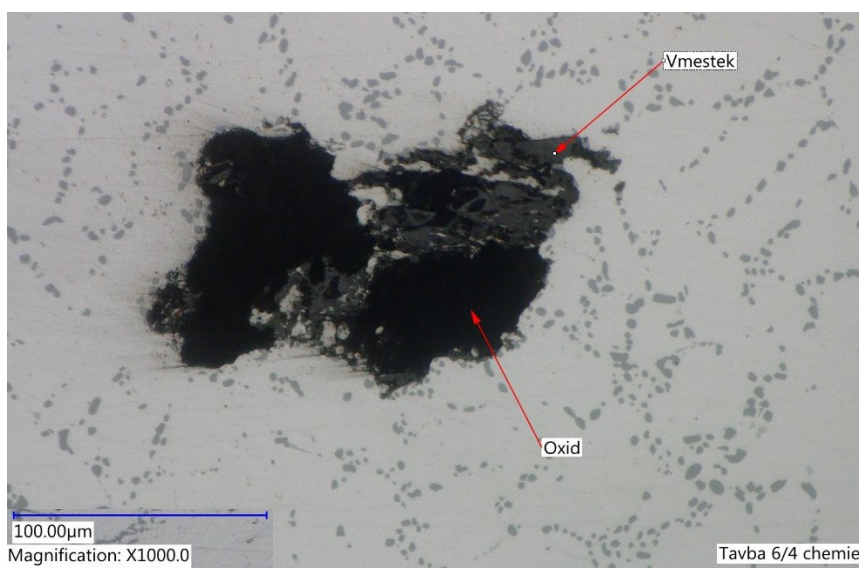


procesu tepelného zpracování. Za pomoci zkušené obsluhy mikroskopu byly ve vzorcích rozpoznány oxidy a vměstky. Ve vzorku tavby 7/3 byl detekován pouze jediný oxid o délce zhruba 50  $\mu\text{m}$  a žádný vměstek (obr. 27).



Obr. 27 Vzorek tavby 7/3 - oxid

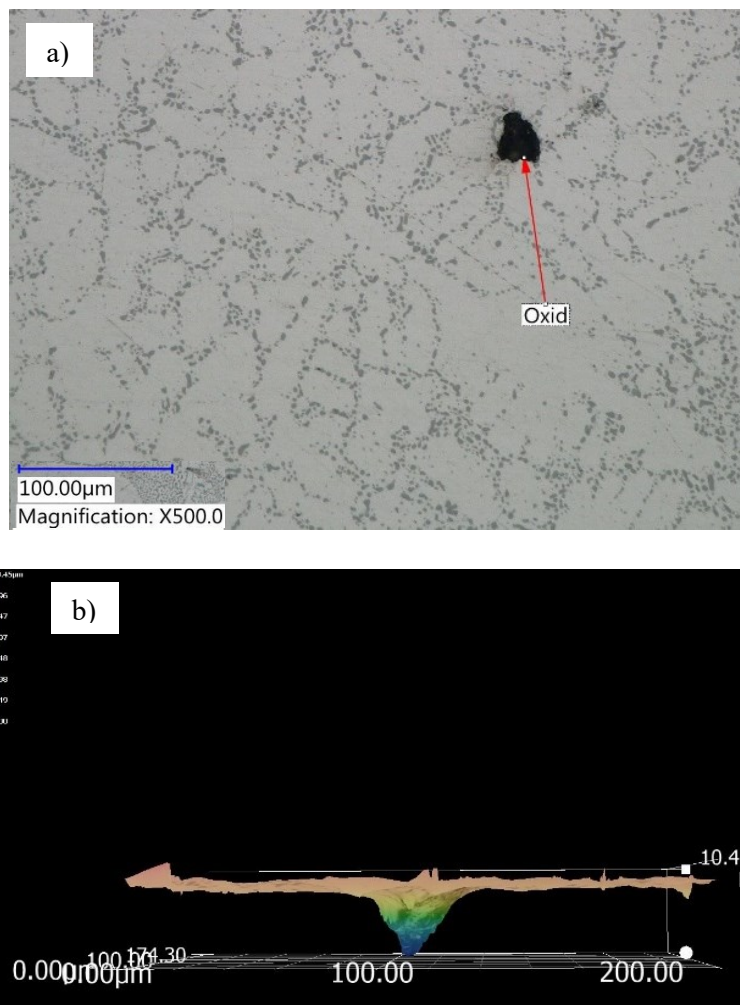
Ve vzorku tavby 6/4 byl detekován pouze jediný vměstek, který byl zároveň příčinou vzniku oxidu s délkou zhruba 150  $\mu\text{m}$  (obr. 28). Celkově byly nalezeny tři velké oxidy.



Obr. 28 Vzorek tavby 6/4 vměstek s oxidem

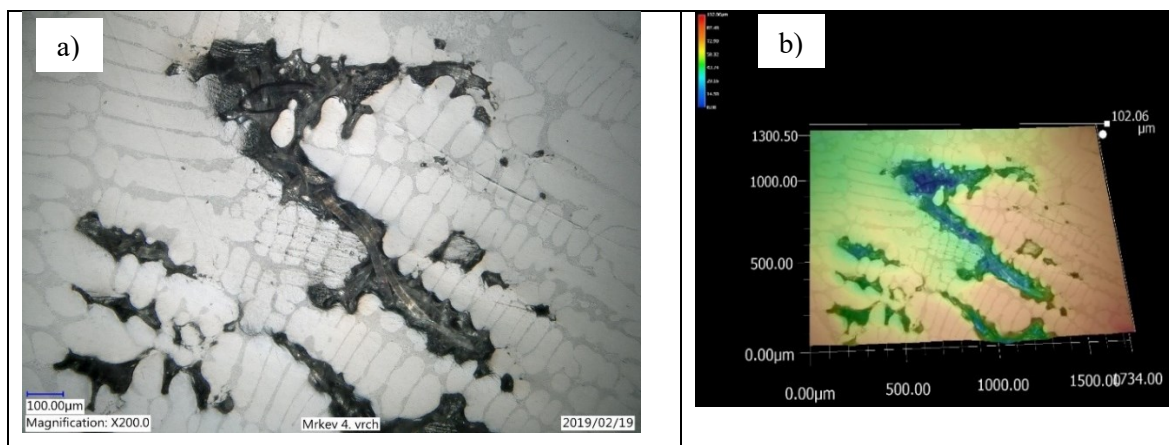
Ve vzorku tavby 5/5 byl detekován pouze jediný malý vměstek a dva oxidy (obr. 29 a). Největší z oxidů byl díky softwaru v mikroskopu nasnímán do 3D modelu. Díky němu byla zjištěna hloubka oxidické vady 10  $\mu\text{m}$  (obr. 29 b). Největší množství strukturních vad obsahoval vzorek z tavby 6/4. Vady tohoto vzorku měly zároveň největší velikost. Celkově

nejčistší strukturu měly vzorky tavby 7/3. Přidaný odpad tedy částečně zvýšil množství vměstků a oxidů ve struktuře.



Obr. 29 Vzorek tavby 5/5: a) metalografický snímek, b) 3D model z bočního pohledu

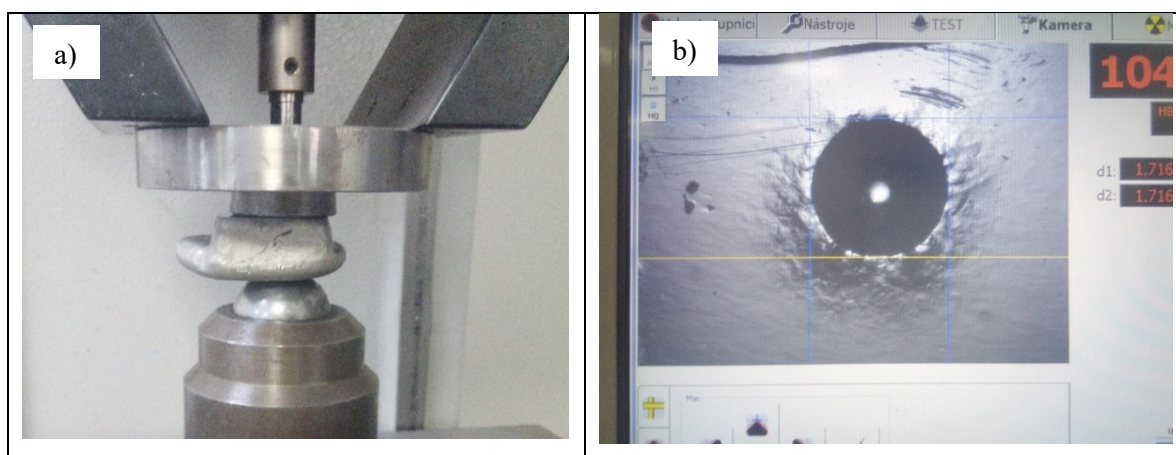
Při pozorování vertikálně rozřezané mrkve byly detekovány staženiny pouze v horní části. Spodní polovina (spojená s odlitkem) byla bez pozorovatelných vad. Největší staženiny jsou viditelné pouhým okem. Pod mikroskopem lze staženiny detekovat tak, že černé prohloubeniny přesně kopírují okraj buňky hliníku  $\alpha$  (obr. 30 a). Na 3D modelu lze zjistit, že největší staženina má délku zhruba 1 mm a hloubku 102  $\mu\text{m}$  (obr. 30 b). Díky produkování mrkví jako odpadu se snižuje riziko vzniku staženin v hlavním odlitku. Samotné staženiny však po roztavení nemají negativní vliv na chemickou kvalitu slitiny. Strukturní vady jako vměstky nebo oxidy nebyly detekovány. Tudíž je odpad nálitkových mrkví bez problémů recyklovatelný.



Obr. 30 Staženiny v mrkvích, a) metalografický snímek b) 3D model.

### 9.2.5 Tvrdost a pevnost

Zkouška tvrdosti probíhala pouze na vzorcích pro chemickou analýzu. Ty byly nejprve využity pro pořízení snímků z mikroskopu, jelikož zkouškou tvrdosti se naruší dokonale vyleštěný povrch. Z každé tavby byly testovány 2 tepelně zpracované vzorky na tvrdost podle Brinella. Daný testovací přístroj měl odchylku 11,9 HBW, tlačnou sílu 2452 N a vnikající těleso SPHERE 5 mm (obr. 31 a). Na každém vzorku byl test proveden třikrát, vždy na různých místech (obr. 31 b).



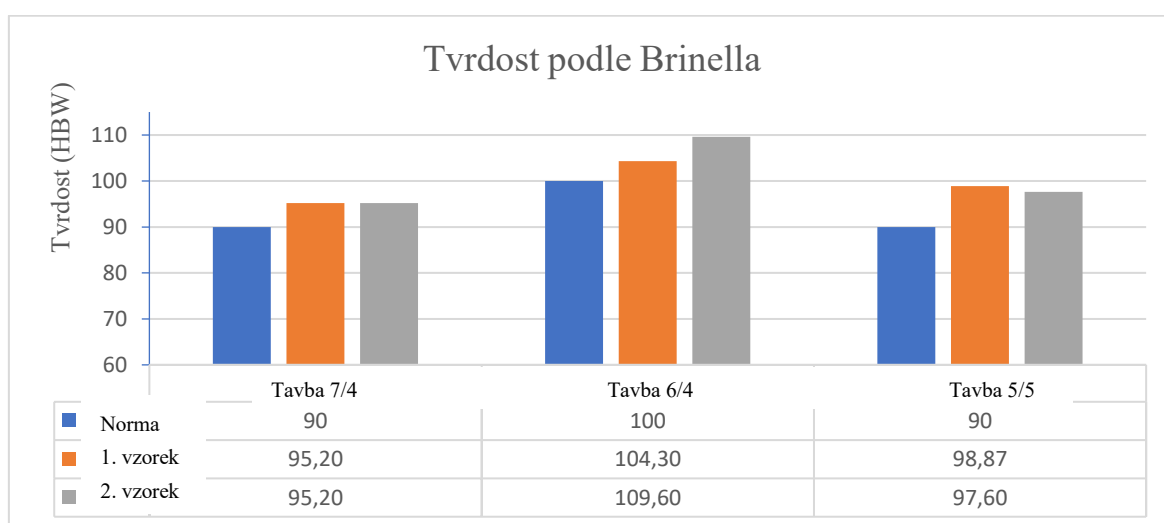
Obr. 31 Tvrdost podle Brinella: a) vzorek při testu, b) hodnocení hloubky vniklého tělesa

Získané hodnoty byly zapsány a zprůměrovány pro každý vzorek zvlášť. Norma pro slitiny z taveb 7/4 a 5/5 má hodnotu 90 HBW. Norma pro slitiny z tavby 6/4 s vyšším obsahem Mg má i vyšší hodnotu tvrdosti 100 HBW. Všechny naměřené hodnoty s rezervou odpovídají předepsaným normám (tabulka 7). Při srovnání hodnot zjistíme, že tavba 5/5 s vyšším podílem odpadu má vyšší tvrdost než tavba 7/3 (obr. 32). Přitom byl očekáván opačný vliv recyklovaného materiálu. Nutno dodat, že tavba 5/5 má v průměru malinko vyšší % Mg ve slitině, což mohlo zapříčinit vyšší tvrdost. Existuje hypotéza, že zvýšenou tvrdost

způsobila vyšší přítomnost vměstků. Závěrem však platí, že hliníkový odpad v našem případě zlepšil tvrdost materiálu.

Tab. 7 Tvrdost podle Brinella

Tavba 7/4		Tavba 6/4		Tavba 5/5	
Jednotky	(HBW)		(HBW)		(HBW)
Norma pro slitinu AlSi7Mg0,3	90	Norma pro slitinu AlSi7Mg0,6	100	Norma pro slitinu AlSi7Mg0,3	90
1. vzorek	95,2	1. vzorek	104,30	1. vzorek	98,87
2. vzorek	95,2	2. vzorek	109,60	2. vzorek	97,60



Obr. 32 Graf hodnot tvrdosti vzorků z experimentálních taveb

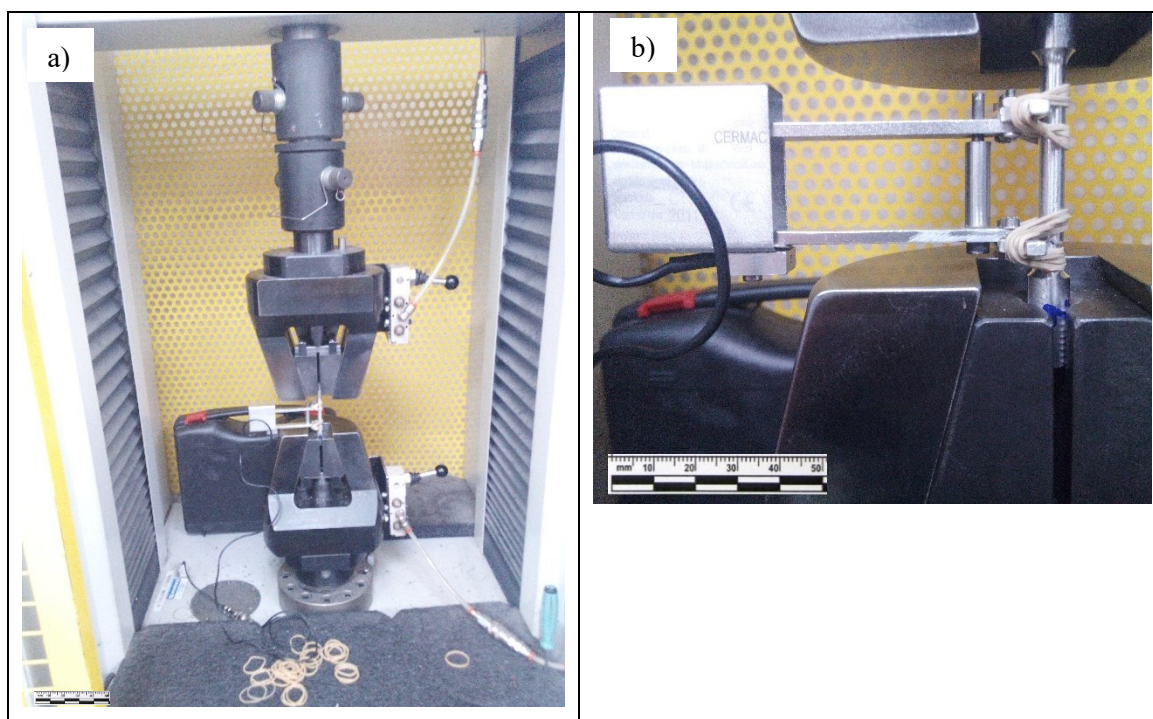
Vzorky pro tahovou zkoušku byly také tepelně zpracovány dle výše popsaného programu. Následně byly nařezány na stejnou délku a obráběny na přesné rozměry dle přednastaveného programu, běžně využívaného v provozu slévárny (obr. 33). Počáteční rozměry obrobené zkušební tyče jsou následující: celková délka  $L_t$  80 mm, zkoušená délka  $L_c = 40$  mm, délka zkoušená extenzometrem  $L_0$  byla v rozmezí 28,65-27,25 mm, průměr zkoušené části  $d_0 = 6 \pm 0,05$  mm a průřez zkoušené části  $S_0 = 28,27 \pm 0,002$  mm<sup>2</sup>.





Obr. 33 Vzorky pro tahovou zkoušku, vlevo před a vpravo po obrobení

Po obrobení následoval samotný test na trhacím stroji s přednastaveným programem pro danou slitinu. Zkušební tyč se vždy uchytila na obou koncích čelistmi a na měřenou část byl připevněn extenzometr (obr 34 a, b). Nejužší naměřená část testovacího vzorku byla do počítače zadána s přesností na 0,01 mm. Poté byl spuštěn automatický test. Z každé skupiny bylo testováno 10 vzorků bez licích vad dle rentgenu a minimálně 1 rezervní vzorek.



Obr. 34 Zařízení pro tahovou zkoušku: a) celkový pohled, b) detail

Po tahových zkouškách byly pozorovány lomové plochy. Na lomových plochách několika vzorků byly zjištěny oxidické vady. U vzorků s nejhoršími výsledky však oxidy nebyly pozorovány. Jejich lomové plochy byly bez viditelných vad (obr. 35). Jelikož vzorky praskaly bez vzniku zúženého krčku, nejedná se o lom bodový, tedy materiál má velmi nízkou



plasticitu. Ze studia povrchu lomové plochy lze vyvodit, že jsou splněny specifikace křehkého a smykového lomu.



Obr. 35 Lomové plochy vzorků po tahové zkoušce

Data získaná ze softwaru tohoto zařízení byly maximální zátěž  $F_m$  (N), pevnost v tahu  $R_m$  (MPa), jednotková zátěž odchylky od poměru  $R_p$  (MPa), maximální roztažnost oblasti destrukce  $A_t$  (%) a modul pružnosti  $E$  (MPa). Pro hodnocení kvality byly jako nejdůležitější vybrány pevnost v tahu  $R_m$ , jednotková zátěž odchylky od poměru  $R_p$  a maximální roztažnost oblasti destrukce  $A_t$ . Výsledky testů byly značně rozdílné. Z důvodu velmi nízkých hodnot některých vzorků se pro výpočet průměrných hodnot využilo pouze 7 nejlepších výsledků z každé kategorie. Ostatní výsledky jsou považovány za neplatné. Průměry nejlepších hodnot pak byly srovnány s obecnou normou mechanických vlastností pro dané slitiny. Norma  $AlSi7Mg0,3$  pro tavbu 5/5 a 7/3 má nižší limitní hodnotu pro  $R_m$  a  $R_p$ , ale vyšší limitní hodnotu pro  $A_t$  než má norma  $AlSi7Mg0,6$  pro tavbu 6/4. Všechny tavby s rezervou převyšují své normy pro  $R_m$  a  $R_p$  (tabulka 8). V případě max. roztažnosti  $A_t$  pouze tavba 6/4 nesplnila normu. Norma  $AlSi7Mg0,6$  pro tavbu 6/4 má nižší nároky na  $A_t$  o jedno procento, přesto se v celé skupině vyskytnul pouze jeden vzorek z jedenácti, který předepsanou normu splnil. Pro tuto slitinu tedy mohl mít recyklovaný odpad negativní vliv na max. roztažnost oblasti destrukce. V tabulce je každé hodnotě přiřazena barevná škála pro danou skupinu, kdy červená barva je pro nejnižší a zelená pro nejvyšší hodnotu. Při porovnání tavby 5/5 a 7/3 s

totožnou normu zjistíme, že tavba 5/5 má o zhruba 15 MPa vyšší  $R_m$ , 11 MPa vyšší  $R_p$  a o 2 % vyšší  $A_t$ . Na základě těchto výsledků měl tedy přidaný odpad do vsázky významně pozitivní vliv na mechanické vlastnosti slitiny.

Tab. 8 Stanovené mechanické charakteristiky v tahu

Tavby	5/5	6/4	7/3
	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Norma pro $R_m$	290	320	290
Průměrná hodnota $R_m$	$314 \pm 5$	$333 \pm 11$	$300 \pm 11$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Norma pro $R_p$	210	240	210
Průměr $R_p$ 7 nejlepších výsledků	$254 \pm 2$	$295 \pm 5$	$243 \pm 3$
	(%)	(%)	(%)
Norma pro $A_t$	4,00	3,0	4,0
Průměr $A_t$ 7 nejlepších výsledků	$8,0 \pm 2$	$2,0 \pm 0,8$	$6,6 \pm 2$

## 10. Závěr

Hliníkových odpadů je mnoho a do budoucna jich podle všeho bude přibývat s ohledem na navyšování výroby. Recyklace je u těchto odpadů velmi výhodná oproti prvovýrobě. Recyklace se vyplácí nejen environmentálně, ale také energeticky a ekonomicky. Specializované firmy v ČR jsou svými recyklačními postupy schopny dát hliníkovým odpadům velkou přidanou hodnotu. Mnoho odpadů lze také recyklovat už v samotném provozu slévárny, včetně závodů vyrábějících odlitky pro automobily.

V experimentální části práce byl ověřen vliv přídavku části výrobních odpadů do vsázky na kvalitu získaných slitin na bázi  $AlSi7Mg$ . Ze získaných výsledků vyplynulo, že přídavek vratného odpadu do vsázky pro tavení v tomto případě významně snížil podíl vznikajícího nerozpuštěného zbytku v peci. Proces tavení tedy produkuje menší množství odpadu. Mezi dalšími pozitivy patří, že se slitině zvýšila tvrdost a pevnostní vlastnosti. V chemickém složení některých negativních prvků mírně přibylo a jiných naopak mírně ubylo. Zvýšený počet vměstků a oxidů byl detekován pod mikroskopem. Tento aspekt zhoršení kvality není detekovatelný při chemické analýze. Pro hodnotu naplynění a ostatní vlastnosti neměl odpad pozorovatelný vliv. Tavba 5/5 s polovičním množstvím odpadu je dle norem plně využitelná pro výrobu odlitků. Pro odlitky náročné na tvrdost a pevnost je dle výsledků vhodné využít vyšší poměr odpadu ve vsázce. Na základě získaných dat lze odhadnout, že k zásadnímu zhoršení kvality nedojde ani při nadpolovičním poměru odpadu ve vsázce. Je však nutné věnovat pozornost rizikům spojeným se zvýšeným výskytem vměstků a oxidů. Návrh zní nepoužívat slitinu s vysokým poměrem odpadu pouze na tenkostěnné odlitky, kde mají oxidy a vměstky vyšší negativní dopad.

Závěrem tedy lze říci, že zpracování výrobních odpadů hliníkové slitiny skutečně přináší v podmínkách slévárny pozitiva i negativa. Výsledky experimentu vyvrátily mnoho představ o rapidním zhoršení kvality slitiny obsahující vratný odpad. Velmi progresivní jsou zjištění, že definovaný vratný odpad při některých testech zvýšil kvalitu hliníkové slitiny. Výhody recyklace převyšují její nevýhody.

## Literatura:

- [1] MIŠKUFOVÁ, A. et al. *Environmentálne aspekty výroby ľahkých kovov I*. Košice, Equilibra s.r.o., 2013. 174 s. ISBN 978-80-8143-083-1.
- [2] SCHLESINGER, Mark E. *Aluminum Recycling second edition*. CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, 2014. 262 s. ISBN 978-1-4665-7025-2.
- [3] WORRELL, E. a M. A. REUTER. *Handbook of recycling: state-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists*. Amsterdam: Elsevier, 2014. 581 s. ISBN 978-0-12-396459-5.
- [4] *The World Counts*. [online]. [cit. 8.3.2019]. Dostupné z: [http://www.theworldcounts.com/counters/world\\_food\\_consumption\\_statistics/aluminum\\_cans\\_facts](http://www.theworldcounts.com/counters/world_food_consumption_statistics/aluminum_cans_facts).
- [5] *Why Brazil is Breaking Records for Recycling Aluminum* [online]. [cit. 2019-03-8]. Dostupné z: <https://www.generalkinematics.com/blog/why-brazil-is-breaking-records-for-recycling-aluminum/>.
- [6] *ALUMINUM* [online]. [cit. 2019-03-8]. Dostupné z: <http://kandkreycling.net/aluminum/>.
- [7] BOLIBRUCHOVÁ D., et al. *Zlievarenské zliatiny Al-Si*. V Žiline: Žilinská univerzita, 2005. 180 s. ISBN 80-8070-485-6.
- [8] GREEN John A. S. *Aluminum recycling and processing for energy conservation and sustainability*. Ohio: Materials Park, 2007. 267 s. ISBN-13: 978-0-87170-859-5. ISBN-10: 0-87170-859-0.
- [9] *Cena za 1kWh zemního plynu v ČR* [online]. [cit. 2019-03-8]. Dostupné z: <https://dodavatelektriny.cz/energeticky-trh/cena-zemniho-plynu>.
- [10] *LME - nejaktuálnější přehled v ČR* [online]. [cit. 2019-03-8]. Dostupné z: <https://www.druhotnesuroviny.cz/lme.htm>.
- [11] *Factory price AlSi7Mg Aluminum alloy powder* [online]. [cit. 2019-03-8]. Dostupné z: [https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-price-AlSi7Mg-Aluminum-alloy-powder\\_60778350575.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-price-AlSi7Mg-Aluminum-alloy-powder_60778350575.html).
- [12] *Recycling Facts* [online]. [cit. 2019-03-8]. Dostupné z: <https://www.recyclingbins.co.uk/recycling-facts/>.
- [13] *Hliník a jeho slitiny* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/o-hliniku>.

- [14] *The Al-Si phase diagram* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/The-Al-Si-phase-diagram-6\\_fig6\\_258390327](https://www.researchgate.net/figure/The-Al-Si-phase-diagram-6_fig6_258390327).
- [15] *Plán odpadového hospodářství ČR* [online]. [cit. 2019-03-8]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/plan\\_odpadoveho\\_hospodarstvi\\_cr](https://www.mzp.cz/cz/plan_odpadoveho_hospodarstvi_cr).
- [16] *Katalog odpadů* [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://www.katalogodpadu.cz/index.php?k1=10&k2=3#top>.



## Seznam použitých zkratk

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý	
UV	Ultra fialové	
ČR	Česká republika	
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý	[kg]
CO	Oxid uhelnatý	[kg]
SO <sub>x</sub>	Oxidy síry	[kg]
NO <sub>x</sub>	Oxidy dusíku	[kg]
PM	Particulate matter	[kg]
Kč	Koruny české	
USD	The United States dollar	
HCl	Chlorovodík	
HF	Fluorovodík	
H <sub>2</sub> S	Sirovodík	
CH <sub>4</sub>	Methan	
H <sub>2</sub> O	Voda	
EN AC-42100	Evropská norma pro odlévanou hliníkovou slitinu	
POH	Plán odpadového hospodářství	
ČSN	Česká státní norma	
Hm. %	Hmotnostní procento	[%]
7/3	Obsah 70 % primárního a 30 % sekundárního hliníku	
m <sub>s</sub>	Skutečná hmotnost	[kg]
Teor.	Teoretické procento	[%]
m <sub>s</sub>	Reální hmotnost vsázky	[kg]
Skut.	Skutečné procento	[%]
Mrkev	Odvzdušňovací nálitky hliníkové slitiny mrkvovitého tvaru	
3D model	Trojrozměrný model	
L <sub>t</sub>	Celková délka	[mm]
L <sub>c</sub>	Zkoušená délka	[mm]
L <sub>0</sub>	Délka zkoušená extenzometrem	[mm]
d <sub>0</sub>	Průměr zkoušené části	[mm]
S <sub>0</sub>	Průřez zkoušené části	[mm <sup>2</sup> ]
F <sub>m</sub>	Maximální zátěž	[N]
R <sub>m</sub>	Pevnost v tahu	[MPa]
R <sub>p</sub>	Jednotková zátěž odchylky od poměru	[MPa]
At	Maximální roztažnost oblasti destrukce	[%]
E	Modul pružnosti	[MPa]